

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Nino Cvetković

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Ivica Garašić

Nino Cvetković

Zagreb, 2013.

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

ZAHVALE

Zahvaljujem djelatnicima Zavoda za zavarene konstrukcije Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu na pomoći, posebno mentoru, doc. dr. sc. Ivici Garašiću na usmjeravanju i korisnim teoretskim i praktičnim savjetima pri izradi ovog rada.

Zahvaljujem zaposlenicima poduzeća Dalekovod proizvodnja d.o.o., što su mi omogućili stvaranje diplomskog rada.

Zahvaljujem obitelji na bezgraničnoj podršci tokom cijelog studija.

Nino Cvetković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **NINO CVETKOVIĆ**

Mat. br.:35971076

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**PRIMJENA ROBOTIZIRANOG MIG ZAVARIVANJA U
PROIZVODNJI KOMPRESIJSKIH STEZALJKI**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**APPLICATION OF ROBOTIZED MIG WELDING IN
PRODUCTION OF COMPRESSION CLAMPS**

Opis zadatka:

Analizirati oblikovanje aluminijskih kompresijskih stezaljki i obrazložiti mogućnost primjene robotiziranog MIG zavarivanja u proizvodnji. Detaljno opisati robotizirano MIG zavarivanje i definirati osnovne značajke robota, pozicionera i izvora struje za zavarivanje aluminija. Proučiti problematiku zavarivanja aluminijskih legura s aspekta postizanja zadovoljavajućih mehaničkih svojstava, odabira postupka zavarivanja, dodatnog materijala, parametara i zaštitnog plina. Analizirati sustav dobave žice i specifičnosti tehnike rada kod MIG zavarivanja aluminija.

U eksperimentalnom dijelu potrebno je izraditi program i odrediti parametre robotiziranog MIG zavarivanja aluminijske kompresijske stezaljke. Na zavarenim uzorcima potrebno je ispitati kvalitetu zavarenog spoja prema zahtjevima HRN EN ISO 15614-2. Načiniti ekonomsku komparativnu analizu za uzorke zavarene poluautomatskim i robotiziranim postupkom MIG zavarivanja. Na temelju rezultata donijeti zaključke o opravdanosti primjene robotiziranog MIG zavarivanja u proizvodnji aluminijskih spojnih elemenata.

Zadatak zadan:

2. svibnja 2013.

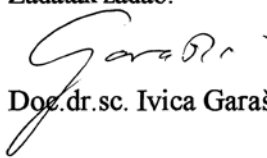
Rok predaje rada:

4. srpnja 2013.


Predviđeni datum obrane:

10., 11. i 12. srpnja 2013.

Zadatak zadao:


Doc.dr.sc. Ilica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

SADRŽAJ	III
POPIS SLIKA	VI
POPIS TABLICA.....	IX
POPIS OZNAKA	X
SAŽETAK.....	XI
1. Uvod.....	1
2. Uloga aluminijskih zateznih kompresijskih stezaljki	2
2.1 Elektroenergetski sustav i elektroenergetske mreže.....	2
2.2 Elementi nadzemnih vodova elektroenergetskih mreža	6
2.2.1 Stupovi	6
2.2.2 Vodiči.....	9
2.2.3 Izolatorski lanci	11
2.3 Aluminijske zatezne kompresijske stezaljke	14
3. MIG zavarivanje	17
3.1 Načini prijenosa metala kod MIG zavarivanja.....	20
3.1.1 Prijenos kratkim spojevima.....	21
3.1.2 Prijenos štrcajućim lukom.....	22
3.1.3 Impulsno MIG zavarivanje.....	23
3.1.4 Sinergijsko upravljanje.....	24
3.2 Oprema za MIG zavarivanje.....	25
3.3 Izvor struje za zavarivanje	26
3.3.1 Sustav za dobavu žice za zavarivanje	28
3.3.2 Pištolj za zavarivanje.....	31
3.3.3 Sustav za upravljanje protokom zaštitnog plina.....	32
3.4 Potrošni materijal za MIG zavarivanje.....	33
3.4.1 Dodatni materijal – žice za MIG zavarivanje.....	33
3.4.1.1 Puna žica	34
3.4.1.2 Praškom punjena žica	35

3.4.2	Zaštitni plinovi	36
3.4.2.1	Svojstva individualnih zaštitnih plinova.....	37
3.4.2.2	Mješavine zaštitnih plinova za zavarivanje aluminija	38
3.5	Parametri MIG zavarivanja	39
3.5.1	Promjer žice.....	39
3.5.2	Napon zavarivanja.....	40
3.5.3	Brzina dodavanja žice i struja zavarivanja.....	40
3.5.4	Brzina zavarivanja.....	40
3.5.5	Induktivitet	41
3.5.6	Duljina slobodnog kraja žice.....	41
3.5.7	Izbor zaštitnog plina i protoka.....	42
3.5.8	Uzorak njihanja pištolja	43
3.5.9	Način prijenosa metala impulsnim zavarivanjem	44
3.6	Tehnike zavarivanja.....	44
4.	Svojstva i zavarljivost aluminija i aluminijskih legura.....	47
4.1	Opća svojstva aluminija.....	47
4.2	Svojstva vezana za zavarljivost	48
4.3	Legirni elementi.....	50
4.4	Metoda označavanja aluminijskih materijala	51
4.4.1	Oznake stanja aluminijskih materijala	52
4.5	Vrste aluminijskih materijala.....	53
4.5.1	Toplinski neobradive legure aluminija.....	55
4.5.2	Toplinski obradive legure aluminija	56
5.	Roboti za MIG zavarivanje	59
5.1	Osnovna građa industrijskih robota.....	59
5.2	Robotska oprema za MIG zavarivanje	64
5.2.1	Pozicioneri.....	65
5.2.2	Oprema za zavarivanje	69
5.2.2.1	Stupanj integracije opreme za zavarivanje u robotski sustav	69
5.2.3	Senzori za elektrolučno zavarivanje.....	71
5.2.3.1	Senzori za traženje zavara.....	71
5.2.3.1.1	Taktilni senzori	72

5.2.3.1.2	Senzori udaljenosti	73
5.2.3.2	Senzori za geometrijske parametre	74
5.2.3.2.1	Optički senzori.....	75
5.2.3.2.2	Elektrolučni senzori.....	79
6.	Eksperiment	82
6.1	Opis eksperimenta	82
6.2	Svojstva aluminijske legure EN AW 6060 T6 (AlMgSi0,5).....	84
6.3	Oprema za zavarivanje	86
6.3.1	Oprema za ručno zavarivanje.....	86
6.3.2	Oprema za robotizirano zavarivanje	87
6.4	Optimizacija parametara robotiziranog zavarivanja.....	93
6.4.1	Program za zavarivanje uzorka „R“	97
7.	Usporedba ručnog i robotiziranog zavarivanja	100
7.1	Vizualna kontrola zavarenog spoja.....	102
7.2	Kontrola makro izbrusaka presjeka zavarenih spojeva	105
7.3	Ekonomska komparativna analiza ručnog i robotiziranog zavarivanja.....	107
7.3.1	Proračun uštede korištenjem robotiziranog postupka zavarivanja.....	111
8.	Zaključak.....	113
9.	Literatura.....	115

POPIS SLIKA

Slika 1.	Elektroenergetska mreža Republike Hrvatske [1]	4
Slika 2.	Karta prijenosne mreže EES-a Republike Hrvatske [2].....	5
Slika 3.	Silujete jednosistemskih čeličnih rešetkastih dalekovodnih stupova [3]	8
Slika 4.	Silujete dvosistemskih čeličnih rešetkastih dalekovodnih stupova [3]	8
Slika 5.	Izolatorski članci [3]	11
Slika 6.	Izolatorski članci od kaljenog stakla [1]	11
Slika 7.	Zatezni izolatorski lanci na 1000 kV vodu (Japan)	13
Slika 8.	Model zatezne kompresijske stezaljke, izometrijski prikaz.....	15
Slika 9.	Model zatezne kompresijske stezaljke, izometrijski prikaz s vidljivim sakrivenim linijama	15
Slika 10.	Prikaz dijelova zatezne kompresijske stezaljke.....	16
Slika 11.	Osnovne značajke procesa MIG zavarivanja [4].....	17
Slika 12.	Oscilogrami struje i napona za različite načine prijenosa metala [6]	20
Slika 13.	Načini prijenosa metala ovisno o struji zavarivanja [6]	20
Slika 14.	Odnos struje zavarivanja i promjera žice [7].....	21
Slika 15.	Izgled oscilograma impulsne struje [6]	23
Slika 16.	Oprema za MIG zavarivanje	25
Slika 17.	Blago padajuća karakteristika izvora struje za zavarivanje [7]	26
Slika 18.	Padajuća karakteristika karakteristika izvora struje zavarivanja [7]	27
Slika 19.	Uređaj za dodavanje žice i kolut žice [5]	28
Slika 20.	Sustav dobave žice za MIG zavarivanje s četiri kotačića [7]	29
Slika 21.	"Push" i "push-pull" način dobave žice za zavarivanje [5]	30
Slika 22.	Kotačići za dobavu žice: s U-utorom, V-utorom i nazubljenim utorom [8].....	30
Slika 23.	Pištolj za MIG zavarivanje [7]	31
Slika 24.	Redukcijski ventil s mjeračem protoka zaštitnog plina.....	32
Slika 25.	Kolut žice za zavarivanje [8].....	33
Slika 26.	Bubnjevi žice za automatizirano zavarivanje, 250 kg do 1000 kg	34
Slika 27.	Provjera promjera i visine zavojnice žice za zavarivanje [5]	35

Slika 28.	Presjeci praškom punjenih žica [9].....	35
Slika 29.	Utjecaj zaštitnog plina na penetraciju zavara kod MIG zavarivanja aluminija [5]	37
Slika 30.	Slobodan kraj žice [5].....	41
Slika 31.	Utjecaj duljine slobodnog kraja žice na oblik zavara [10]	42
Slika 32.	Shematski prikaz raznih načina vođenja pištolja njihanjem [11]	44
Slika 33.	Učinci desne i lijeve tehnike zavarivanja [5]	45
Slika 34.	Kut pištolja za zavarivanje kutnih spojeva [5]	46
Slika 35.	Zone zavara na aluminijskom materijalu [11].....	49
Slika 36.	Najčešće greške zavarenog spoja na aluminijskim materijalima [11].....	49
Slika 37.	Povećanje čvrstoće aluminijskih materijala hladnom deformacijom [11]	54
Slika 38.	Povećanje čvrstoće aluminija legiranjem [11].....	54
Slika 39.	Osnovni tipovi zglobova industrijskog robota [15].....	61
Slika 40.	Najčešće konfiguracije industrijskih robota	62
Slika 41.	Jednoosni pozicioner [5]	66
Slika 42.	Dvoosni pozicioner [5].....	67
Slika 43.	Stol s izmjenom radnog mjesta [5].....	67
Slika 44.	Jednoosni pozicioner s vertikalnom izmjenom radnog mjesta [5]	68
Slika 45.	Jednoosni pozicioner s horizontalnom izmjenom radnog mjesta [5]	68
Slika 46.	Dvoosni pozicioner s izmjenom radnog mjesta [5]	68
Slika 47.	Naponski taktilni senzor [16]	72
Slika 48.	Blizinski senzor (proximity sensor) za detekciju žlijeba za zavarivanje [16]	73
Slika 49.	Princip rada metode triangulacije [6]	75
Slika 50.	Princip skeniranja zavara s metodom triangulacije [6]	76
Slika 51.	Prikaz laserskog senzora na vrhu pištolja za zavarivanje [6]	77
Slika 52.	Proces ekstrakcije značajki spoja i segmentacije [6].....	78
Slika 53.	Centralna točka alata (TCP) i geometrija kod praćenja zavara njihanjem [6].....	79
Slika 54.	Praćenje trajektorije zavarivanja pomoću senzora [16].....	81
Slika 55.	Primjer zavarivanja izratka kompleksne geometrije s neprecizno pozicioniranim dijelovima [16].....	81
Slika 56.	Radionički crtež tijela zatezne kompresijske stezaljke.....	83
Slika 57.	Izvor struje za MIG zavarivanje s dodavačem žice (lijevo) i pozicioner (desno)	86
Slika 58.	Robotski sustav Varstroj VRC-1G MIG + 1G TIG / 1dm	87

Slika 59.	Robotski manipulator OTC Almega AX-V6.....	88
Slika 60.	Upravljačka jedinica Almega AX-C (lijevo), privjesak za učenje (sredina) i operatorski panel (desno).....	89
Slika 61.	Oprema za robotizirano MIG zavarivanje	90
Slika 62.	Ručni pozicioner Iskra KLN 061-00	91
Slika 63.	Naprava za pozicioniranje izratka	92
Slika 64.	Probni uzorak zavaren u PB položaju	95
Slika 65.	Probni uzorci s greškom naljepljivanja	95
Slika 66.	Probni uzorak uz korištenje maksimalne vrijednosti korekcijskog parametra " <i>arc tuning</i> "	96
Slika 67.	Uzorak "R"	96
Slika 68.	Robotski program za zavarivanje uzorka "R"	98
Slika 69.	Zavarivački potprogram za zavarivanje uzorka "R".....	99
Slika 70.	Kut pištolja prilikom ručnog zavarivanja (gore) i robotskog zavarivanja (dolje)	100
Slika 71.	Izgled zvara uzorka kompresijske stezaljke zavarenog ručnim postupkom	103
Slika 72.	Izgled zvara uzorka kompresijske stezaljke zavarenog robotiziranim postupkom.....	103
Slika 73.	Izgled zvara uzorka kompresijske stezaljke zavarenog ručnim postupkom	104
Slika 74.	Izgled zvara uzorka kompresijske stezaljke zavarenog robotiziranim postupkom.....	104
Slika 75.	Makro izbrusak presjeka uzorka zavarenog ručnim postupkom	106
Slika 76.	Makro izbrusak presjeka uzorka zavarenog robotiziranim postupkom.....	106
Slika 77.	Usporedba proizvodnosti i dimenzija ručno i robotizirano izvedenog zvara	107
Slika 78.	Vremena zavarivanja korištenjem robotiziranog postupka	108
Slika 79.	Razlika utrošenog dodatnog materijala između zavarivanja ručnim i robotiziranim postupkom.....	109
Slika 80.	Smanjenje utroška zaštitnog plina korištenjem robotiziranog postupka	110
Slika 81.	Udio uštede pojedinog čimbenika u ukupnoj uštedi.....	112
Slika 82.	Uštede pojedinih čimbenika robotizacijom u odnosu na ručni postupak	112

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Duljine vodova prijenosne mreže EES-a Republike Hrvatske [2]	5
Tablica 2.	Dijelovi zatezne kompresijske stezaljke	16
Tablica 3.	Standardni koluti za zavarivanje [8].....	33
Tablica 4.	Standardni promjeri punih i praškom punjenih žica za zavarivanje [8].....	34
Tablica 5.	Svojstva čistog aluminija [11].....	47
Tablica 6.	Mehanička svojstva nekih aluminijskih materijala [11]	58
Tablica 7.	Fizička svojstva aluminijske legure EN AW 6060 (AlMgSi0,5) pri temperaturi 20 °C.....	84
Tablica 8.	Kemijski sastav legure EN AW 6060 (AlMgSi0,5) prema normi HRN EN 573-3	84
Tablica 9.	Mehanička svojstva aluminijske legure EN AW 6060 T6 prema normi HRN EN 755-2.....	84
Tablica 10.	Programi rada pozicionera Iskra KLN 061-00.....	92
Tablica 11.	Kemijski sastav navara izvedenog žicom UTP A 495 Mn (AlMg4.5Mn).....	94
Tablica 12.	Deklarirani sastav žice za zavarivanje Lincoln Electric LNM AlMg5	94
Tablica 13.	Usporedba mehaničkih svojstava žica UTP A 495 Mn (AlMg4.5Mn) i LNM AlMg5.....	94
Tablica 14.	Usporedba parametara ručnog i robotiziranog zavarivanja.....	101
Tablica 15.	Sastav kiseline za nagrivanje makro izbrusaka aluminija	105
Tablica 16.	Ušteda novaca korištenjem robotiziranog zavarivanja godišnje količine stezaljki	111

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
EES		Elektroenergetski sustav
OHTL		Dalekovod (engl. <i>Overhead transmission line</i>)
SN mreža		Srednjenaponska (distribucijska) elektroenergetska mreža
NN mreža		Niskonaponska (distribucijska) elektroenergetska mreža
VN mreža		Visokonaponska (prijenosna) elektroenergetska mreža
ACSR		Aluminijski vodič s čeličnom jezgrom (engl. <i>aluminium conductor steel reinforced</i>)
ACS		Čelik presvučen aluminijem (engl. <i>aluminium clad steel</i>)
OPGW		Zaštitno užice sa svjetlovodnim nitima (engl. <i>optical ground wire</i>)
ACCR		Aluminijski vodič s kompozitnom jezgrom (engl. <i>aluminium conductor composite reinforced</i>)
U	V	Napon električne struje
I	A	Jakost električne struje
R _e	N/mm ²	Granica razvlačenja
R _m	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
v _{zav}	cm/min	Brzina zavarivanja
v _ž	m/min	Brzina dodavanja žice za zavarivanje
MIG/MAG		Elektrolučno zavarivanje u zaštiti inertnog/aktivnog plina (engl. <i>metal inert/active gas</i>)
REL		Ručno elektrolučno zavarivanje
TIG		Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom sa ili bez dodatnog materijala (engl. <i>tungsten inert gas</i>)

SAŽETAK

Na početku ovog rada je analizirana primjena, oblikovanje i zahtjevi koje moraju zadovoljavati aluminijske zatezne kompresijske stezaljke, detaljno je opisan postupak i oprema za MIG zavarivanje, te su analizirana su svojstva i zavarljivost aluminija i aluminijskih legura.

Definirane su značajke robotskog sustava za zavarivanje MIG postupkom: robotskog manipulatora, pozicionera i izvora struje za zavarivanje.

U eksperimentalnom dijelu je zavaren uzorak ručnim procesom MIG zavarivanja kakav se koristi u proizvodnji zateznih kompresijskih stezaljki. Na osnovi toga je izrađen program i određeni su parametri robotiziranog MIG zavarivanja zateznih kompresijskih stezaljki. Uzorci su ispitani vizualnom kontrolom i analizom makro izbrusaka presjeka zavara prema zahtjevima norme HRN EN ISO 15614-2.

Opravdanost korištenja robotiziranog postupka zavarivanja je dokazana usporednom ekonomskom analizom zavarenih uzoraka zatezne kompresijske stezaljke.

Ključne riječi: MIG zavarivanje, aluminijske legure, robot

1. UVOD

Poduzeće Dalekovod proizvodnja d.o.o. proizvodi aluminijske zatezne kompresijske stezaljke u razmjerno velikim serijama korištenjem poluautomatskog postupka MIG zavarivanja uz jednostavnu mehanizaciju, te se u daljnjem tekstu navodi kao ručno zavarivanje.

Radi se o varijantnom proizvodu koji ovisi o projektu i tržištu. Proizvodnja ovjesne opreme za dalekovode se većim djelom oslanja na izvoz, gdje je potrebna velika fleksibilnost varijanti proizvoda i rokova isporuke.

Veće serije i varijantnost proizvoda su osnovi razlozi razmatranja primjene robotiziranog zavarivanja zateznih kompresijskih stezaljki u ovom radu.

Robotska stanica je visoko produktivan ali i fleksibilan proizvodni sustav, koji se lako i brzo koristi za proizvodnju različitih proizvoda i njihovih varijanti nakon početnog uvođenja tehnologije, odnosno programiranja.

Roboti za zavarivanje su zbog toga gotovo u potpunosti zamijenili automate za zavarivanje. Danas najviše robota za zavarivanje koristi MIG/MAG postupak zavarivanja.

Robotizirano zavarivanje se smatra razvijenom i pouzdanom tehnologijom. Unatoč tome, daleko najveći dio zavara izvedenih elektrolučnim postupcima, uključujući MIG zavarivanje, se još uvijek izvodi ručno.

Taj značajan potencijal robotizacije je dodatan razlog koji čini istraživanje opravdanosti primjene tehnologije robotiziranog MIG zavarivanja zanimljivim.

2. ULOGA ALUMINIJSKIH ZATEZNIH KOMPRESIJSKIH STEZALJKI

Radi razumijevanja uvjeta korištenja aluminijskih zateznih kompresijskih stezaljki, u ovom poglavlju su opisani sustavi i sklopovi, tj. proizvodi u kojima se koriste iste.

2.1 Elektroenergetski sustav i elektroenergetske mreže

Elektroenergetski sustav (EES) se sastoji od četiri osnovne cjeline [1]:

- Elektrane (izvori električne energije) – različita postrojenja u kojima se proizvodi električna energija. Svaka elektrana sadrži slijedeće jedinice:
 - Električne generatore – proizvode električnu energiju i aktivni su element mreže.
 - „Blok“ transformatore, koji služe za prilagodbu proizvedene električne energije na naponski nivo voda na koji je elektrana priključena.

Elektrane (generatori) većih snaga se priključuju na prijenosnu mrežu, oni manjih snaga se priključuju na distribucijsku mrežu („distribuirani izvori“) ili direktno na instalacije potrošača („potrošačke elektrane“).

- Prijenosna mreža – služi za transport električne energije od elektrana do distribucijske mreže i velikih potrošača, te razmjenu snage između povezanih elektroenergetskih sustava.

Sastoji se od zračnih („OHTL“) i kablskih vodova visokog napona (najčešće 110 kV i više) i rasklopnih postrojenja (transformatorske stanice koje omogućavaju transformaciju električne energije iz mreže jednog naponskog nivoa u mrežu drugog naponskog nivoa i razdjelna postrojenja u kojima se učvori nekoliko vodova).

Prijenosnu mrežu čine slijedeći elementi, kao sastavni dio elektroenergetske mreže:

- Zračni i kablski vodovi – njima se električna energija prenosi između dva rasklopna postrojenja, obično na velike udaljenosti (od nekoliko kilometara do više stotina kilometara).
- „Mrežni“ transformatori – služe za transformiranje električne energije iz jednog naponskog nivoa u drugi:
 - Između dvije podmreže unutar prijenosne mreže (npr. 400/220 kV, 220/110 kV, 400/110 kV).

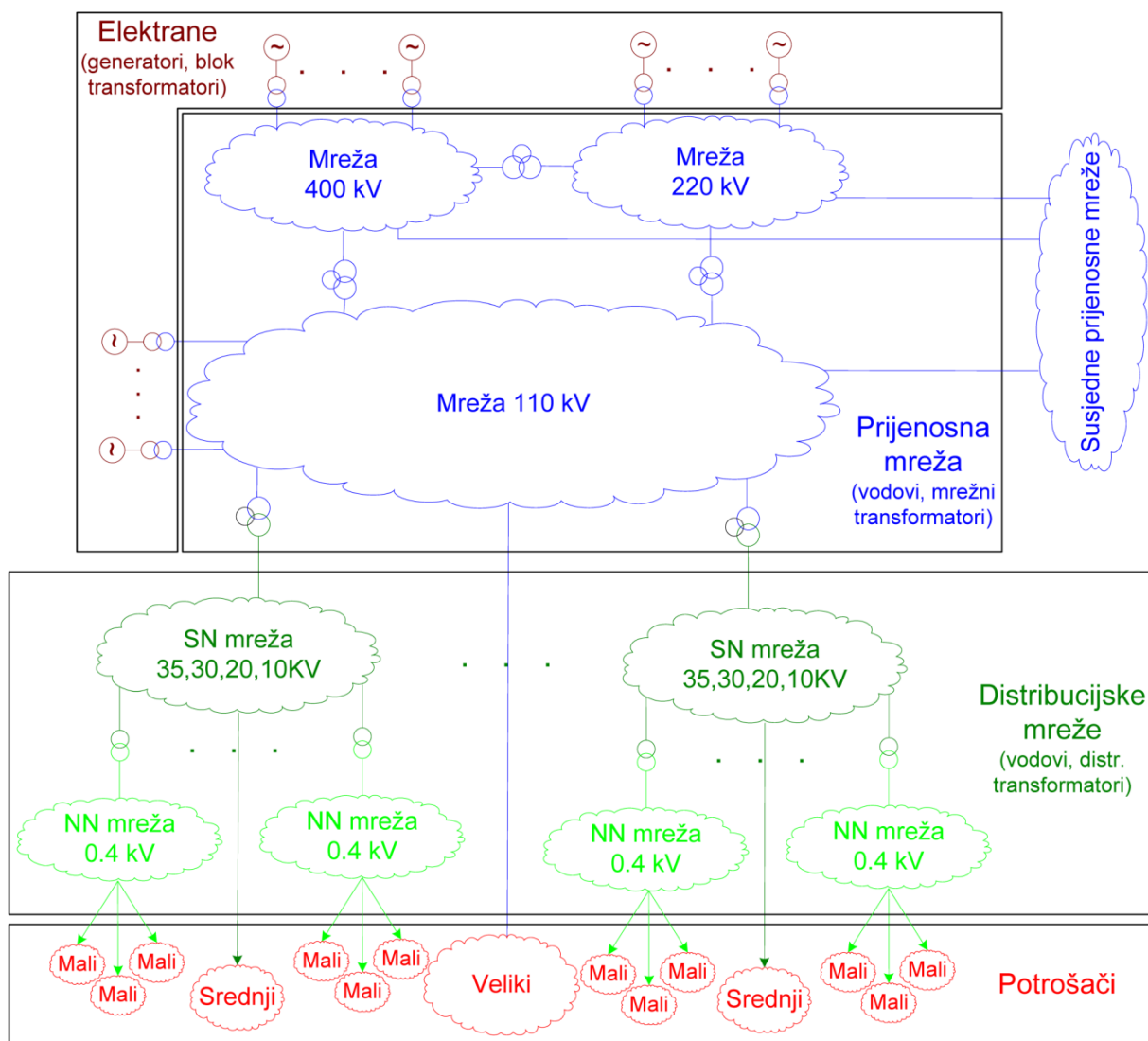
- Iz prijenosne mreže u distribucijsku mrežu (npr. 110/35 kV, 110/10 kV).
- Iz prijenosne mreže u električno postrojenje velikog industrijskog potrošača (npr. 110/6 kV).
- Distribucijska mreža – njome se električna energija preuzeta iz prijenosne mreže ili manjih elektrana priključenih na distribucijsku mrežu distribuira do srednjih i malih potrošača priključenih na distribucijsku mrežu. Kao i prijenosna mreža, sastoji se od zračnih i kablskih vodova, koji su nižeg nazivnog naponskog nivoa nego kod prijenosne mreže i raslopnih postrojenja, koja su također manjeg nazivnog napona nego u prijenosnoj mreži.

Distribucijska mreža se klasificira kao:

- Srednjenaponska distribucijska mreža (SN) – najčešće nazivnih naponskih nivoa 10 kV, 20 kV i 35 kV.
- Niskonaponska distribucijska mreža (NN) – najčešće nazivnog napona 0,4 kV.

U distribucijskoj mreži, koja je dio elektroenergetske mreže se pojavljuju slijedeći elementi:

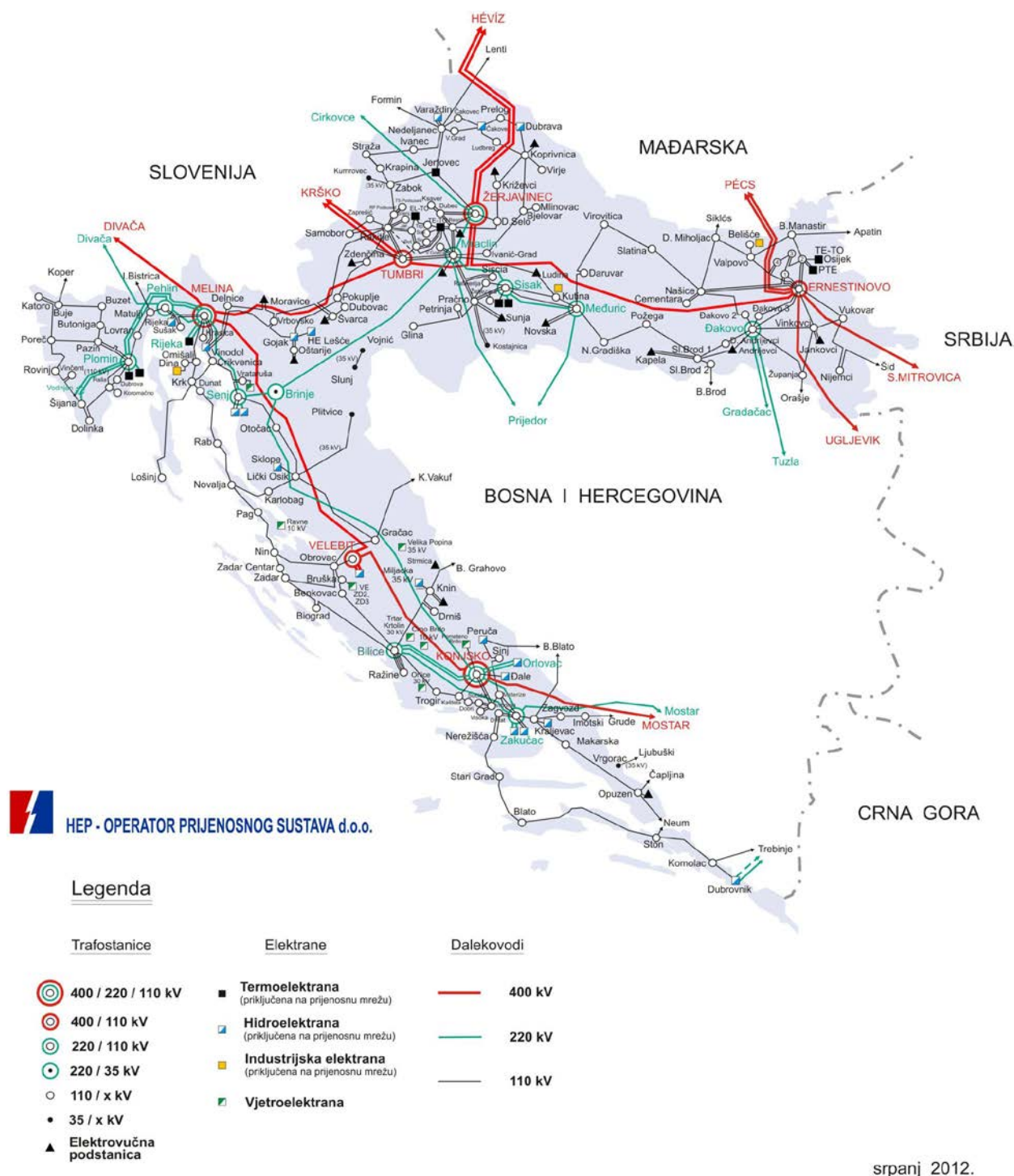
- Zračni i kablski vodovi – služe za prijenos električne energije na udaljenosti koje su značajno manje u odnosu na prijenosnu mrežu; od nekoliko desetaka metara do nekoliko desetaka kilometara.
- „Distribucijski“ transformatori – pomoću njih se električna energija transformira iz jednog naponskog nivoa u drugi.
- Potrošači električne energije - preuzimaju električnu energiju iz prijenosne ili distribucijske mreže i troše je za vlastite potrebe, tj. za napajanje različitih vrsta električnih trošila.



Slika 1. Elektroenergetska mreža Republike Hrvatske [1]

Slika 1 shematski prikazuje sustav elektroenergetske mreže, s nazivnim naponskim nivoima koji se koriste u Republici Hrvatskoj i regiji.

U prijenosnoj mreži Republike Hrvatske koriste se vodovi nazivnog napona 400kV, 220kV i 110kV, dok se u distribucijskoj mreži koriste vodovi nazivnog napona 35kV, 30kV, 20kV, 10kV i 0.4kV. U različitim industrijskim postrojenjima (pogonima) koriste se i naponi 6 kV, 3kV i 1kV, a u elektranama se za nazivne generatorske napone koriste i naponi 4kV, 12kV, 16kV, 25kV itd. [1]



Slika 2. Karta prijenosne mreže EES-a Republike Hrvatske [2]

Tablica 1. Duljine vodova prijenosne mreže EES-a Republike Hrvatske [2]

Napon	Ukupno
400 kV	1247 km
220 kV	1210 km
110 kV	4782 km
Srednji napon	198 km
Ukupno:	7437 km

Slika 2 i Tablica 1 prikazuju raspored i duljine vodova prijenosne elektroenergetske mreže u Hrvatskoj. U zbroj ulaze i dvostruki i višesistemski vodovi.

2.2 Elementi nadzemnih vodova elektroenergetskih mreža

Nadzemni visokonaponski i srednjenaponski vodovi elektroenergetskih mreža su interesantni jer se u njima koriste aluminijske zatezne kompresijske spojnice.

Osnovni elementi nadzemnog voda, poredani po redoslijedu izvođenja su [3]:

- temelji s uzemljivačem,
- stupovi s uzemljenjem,
- izolatorski lanci s spojnom i zaštitnom opremom,
- vodiči i zaštitna užad.

Temelji i sustavi uzemljenja nisu značajni za ovaj rad, međutim ostali elementi nadzemnih vodova SN i VN mreža su ukratko elaborirani jer su funkcionalno povezani sa zateznim kompresijskim spojnica.

2.2.1 Stupovi

Stupovi osiguravaju vodičima odgovarajuću visinu nad tlom.

Mehanički su opterećeni na slijedeće načine [1]:

- Vertikalno prema dolje djeluje težina vodiča, izolatorskog lanca i eventualno dodatnog tereta na vodičima (npr. led).
- Horizontalno u smjeru trase voda djeluju sile horizontalnog zatezanja vodiča, koje se djelomično ili u cijelosti mogu poništiti.
- Horizontalno okomito na trasu voda djeluje vjetar na vodiče i stupove.

Po položaju u trasi stupovi se dijele na [1]:

- linijske, koji se nalaze u ravnom dijelu vertikalne projekcije trase,
- kutne, koji se nalaze na mjestima loma vertikalne projekcije trase.

Po načinu vješanja vodiča stupovi se dijele na [1]:

- nosne (nosni izolatori i izolatorski lanci), kod kojih se u neporemećenom stanju horizontalne sile u smjeru trase uvijek poništavaju,

- zatezne (zatezni izolatori i izolatorski lanci), kod kojih se u neporemećenom stanju horizontalne sile u smjeru trase djelomično poništavaju, tj. uvijek postoji određeni iznos horizontalne sile u jednom smjeru.

Za vodove preko 10 kV se koriste pretežno rešetkasti stupovi od pocinčanog čelika zbog povoljnog odnosa mase i nosivosti.

Na konstrukciju stupa utječe veličina nazivnog napona voda, materijal, presjek i broj vodiča. Uvjeti rada zračnih vodova ovise puno o klimatskim uvjetima i o mjestu kuda prolaze (polja, šume, naselja, rijeke, brda, klanci i dr.) i s čime se križaju (ceste, pruge, cjevovodi, drugi vodovi i sl.). Zbog toga se upotrebljavaju različiti tipovi stupova duž trase dalekovoda.

Nosni (linijski) stupovi služe za nošenje vodiča na ravnim odsječcima voda, normalno im izolatorski lanci (s nosnim stezaljkama) vise vertikalno (jer ne postoje horizontalne sile u smjeru voda), obično ih ima najviše, konstrukcijski su najmanje zahtjevni i stoga najjeftiniji.

Za razliku od njih, *zatezni stupovi* se dimenzioniraju na preuzimanje opterećenja u smjeru voda uslijed različitih horizontalnih sila (natega) i kod prekida pojedinih vodiča u vodu (njihovi izolatori imaju otpusne stezaljke).

Rasteretni stupovi imaju svrhu fiksiranja vodiča u određenim točkama dalekovoda. Izolatorski lanci s čvrstim stezaljkama primaju cjelokupni nateg vodiča i nalaze se u skoro vodoravnom položaju, kao da su produžetak vodiča. Dimenzionirani su da podnesu prekid svih užeta s jedne strane stupa kod vodiča i užeta opterećenih ledom. Kada treba povećati sigurnost dalekovoda, koriste se također dvostruki izolatorski lanci. Manje su zahtjevi na opterećenja kutnih stupova kod kojih trasa mijenja smjer i koji su jednako opremljeni.

Veličina opterećenja ovisi o kutu promjene smjera tako da za male kutove (do 3°) možemo koristiti tip nosnog stupa, a za veće kutove tip rasteretnog stupa.

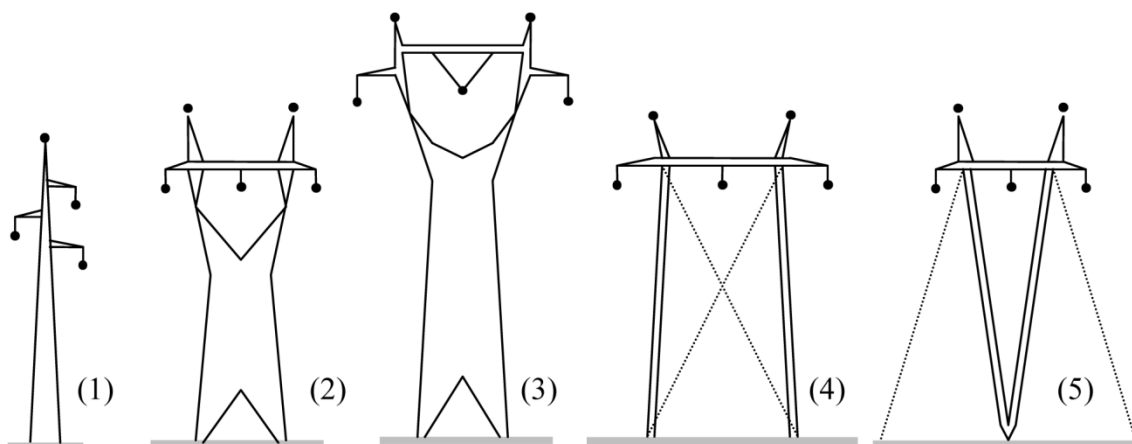
Krajnji stupovi postavljaju se kod ulaza ili izlaza iz postrojenja elektrane ili transformatorske stanice. Ovaj stup prima sve sile koje djeluju u vodičima voda do najbližeg rasteretnog stupa, jer su kratki vodiči u krugu postrojenja vrlo slabo nategnuti.

Križišni stupovi su po opremi rasteretni i upotrebljavaju se kod križanja s drugim vodom (ili vrlo velikih raspona) te moraju biti vrlo visoki.

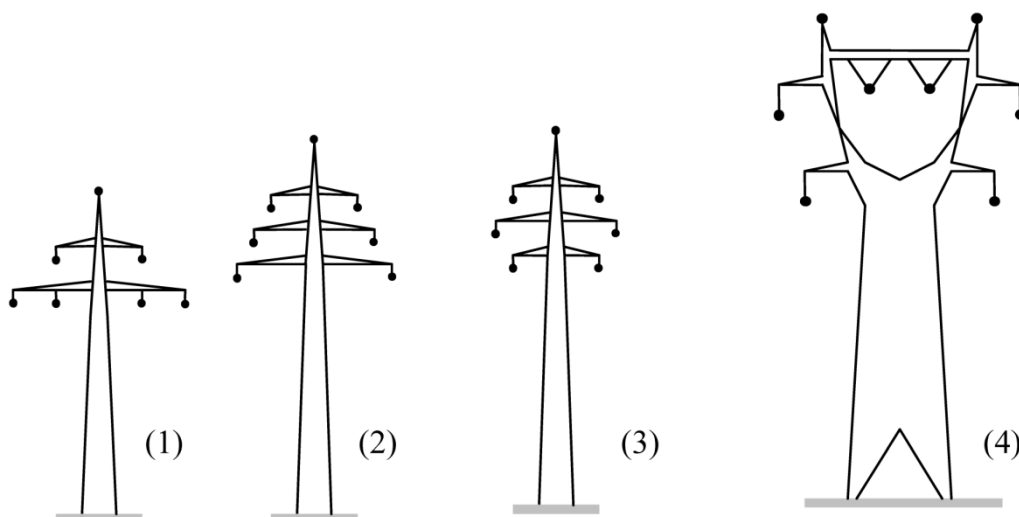
Prepletni stup ima karakteristike rasteretnog stupa i koristi se na onim mjestima gdje svi vodiči ili dio njih moraju promijeniti svoja mjesta u rasporedu radi postizanja električne simetrije voda.

Preponski stup se postavlja tamo gdje zbog promjene presjeka ili dopuštenog naprezanja vodiča nateg nije jednak s obje strane (kod prijelaza dalekovoda preko rijeka, prometnica, klanaca i dr.) i po opremi je rasteretni. Ako se radi o visokom i skupom stupu, može se koristiti manje visine preponskih (rasteretnih) stupova uz umetanje visokog meñustupa u preponsko-rasteretni raspon.

Međustup je visoki stup koji je po opremi i konstrukciji nosni stup, pa je prema tome jeftiniji od stupova te visine otpornih na horizontalna opterećenja uzduž voda (rasteretni, preponski).



Slika 3. Siluete jednosistemskih čeličnih rešetkastih dalekovodnih stupova [3]



Slika 4. Siluete dvosistemskih čeličnih rešetkastih dalekovodnih stupova [3]

Slika 3 prikazuje neke od čestih izvedbi jednosistemskih čelično-rešetkastih stupova, odnosno stupova koji nose jednu „trojku“ faznih vodiča i zaštitnu užad na vrhu. Nazivi im često proizlaze iz oblika: 1) jela, 2) ipsilon, 3) mačka, 4) „finski“ sidreni stup, 5) sidreni V-stup.

Slika 4 prikazuje tipične dvosistemske čelično-rešetkaste stupove, tj. stupove za dvije „trojke“ faznih vodiča: 1) Dunav, 2) jela, 3) bačva, 4) modificirana „mačka“.

Zaključuje se kako se na svim stupovima osim nosnih koriste zatezne stezaljke, koje su kod visokonaponskih i većine srednjenaponskih vodova upravo aluminijske kompresijske stezaljke.

One prenose horizontalnu silu napetosti vodiča na stup i to na kritičnim mjestima gdje nikako ne smije doći do pada vodiča.

Iz toga proizlazi potreba za odgovornim mehaničkim oblikovanjem i pažljivom izboru tehnologije izrade zateznih aluminijskih kompresijskih stezaljki.

2.2.2 Vodiči

Zbog izloženosti vremenskim uvjetima; ledu, vjetru i ekstremnim temperaturama i lokalnom kemijskom onečišćenju zraka, vodiči nadzemnih vodova i njihova zaštitna užad rade pod teškim uvjetima.

Dakle, osim električnim, nadzemni vodiči su izloženi i visokim mehaničkim i kemijskim opterećenjima, te termičkim zbog gubitaka u vidu Jouleove topline.

Osnovna podjela vodiča koji se koriste u elektroenergetskim mrežama je prema materijalu izrade:

- vodiči od bakra i bakrenih legura,
- vodiči od aluminija i aluminijskih legura, koji mogu sadržati ojačanja od čelika ili polimernih materijala,
- užad od pocinčanog čelika ili čelika prevučenog aluminijem; ne koristi se za fazne vodiče već za zaštitnu užad.

Aluminijski vodiči imaju dvostruko manju masu u odnosu na električnu vodljivost od bakrenih, a uz to su dvostruko jeftiniji. Uz to aluminij ima dvostruko veći specifični toplinski kapacitet od bakra. Stoga je razumljivo kako se za nadzemne vodove danas koriste pretežno aluminijski vodiči.

S druge strane, mehanička čvrstoća aluminijskih vodiča je znatno manja od bakrenih, posebno žilavost.

Manja gustoća aluminija u odnosu na bakar uzrokuje veći promjer i manju masu aluminijskih vodiča, što kod nadzemnih vodova rezultira većom amplitudom eolskih vibracija.

Fazni vodiči se štite od atmosferskih električnih pražnjenja zaštitnim užetima postavljenim iznad njih.

Tipovi vodiča prema konstrukciji vodiča su:

- Homogeni (jednožični) vodiči – sastoje se od jedne žice punog profila. Koristi se čelični ili bakreni materijal. Upotrebljava se za niže naponske nivoe, manje raspone i presjek do 16 mm². Osnovni nedostatak im je slaba elastičnost.
- Višežični jednovrsni vodiči (užad) – sastoje se tipično od 7 do 61 usukanih žica jednakog presjeka. Izrađuju se od čelika, bakrenih i aluminijskih legura.
- Višežični vodiči (užad) od dva metala:
 - sa dvije grupe homogenih žica - najrašireniji primjer su ACSR (Al/Če) vodiči koji se sastoje od aluminijskog omotača predviđenog za preuzimanje električnog opterećenja i čelične jezgre, za mehaničku nosivost. Omjer površine presjeka čeličnog i aluminijskog dijela je tipično 6:1. Vrijedni spomena su „vrući“ vodiči, varijacija ACSR vodiča za rad na povišenim temperaturama uz povećano električno opterećenje i viši električni otpor. Koriste se posebne legure vodiča (pa tako i kompresijskih stezaljki) i često su obojani u crnu boju radi kemijske zaštite i bolje emisije Jouleove topline.
 - s jednakim žicama iz dva materijala – izrađuje se iz čeličnih žica obloženih bakrom (komercijalnog naziva „copperweld“) ili aluminijskim (ACS – aluminium clad steel ili „aluweld“). Prednost im je dobra zaštita čelika od korozije i povećana električna vodljivost. Koristi se za zaštitnu užad
- Specijalni vodiči – postoji velik broj varijacija, koje se u svrhu ovog rada dijele na:
 - vodiče za koje se mogu koristiti kompresijske stezaljke (npr. sektorski vodiči),
 - vodiče za koje se ne mogu koristiti kompresijske stezaljke (npr. vodiči s integriranim optičkim vlaknima za širokopojasne telekomunikacijske sustave, od kojih se danas vrlo često koristi tzv. OPGW izvedba zaštitne užadi, te šuplji vodiči za smanjenje gubitaka zbog korone pri naponskim nivoima od 220 kV na više),
 - vodiče za koje se koriste specijalne izvedbe kompresijskih stezaljki (npr. ACCR užad s aluminijskim plaštem i kompozitnom jezgrom).

Zbog ograničene duljine vodiča, potrebno ih je nastavljati spojnicama i u svrhu mehaničkog rasterećenja se koriste zatezne stezaljke.

Danas se uglavnom koriste spojnice i zatezne stezaljke kompresijskog tipa, zbog kvalitete i pouzdanosti.

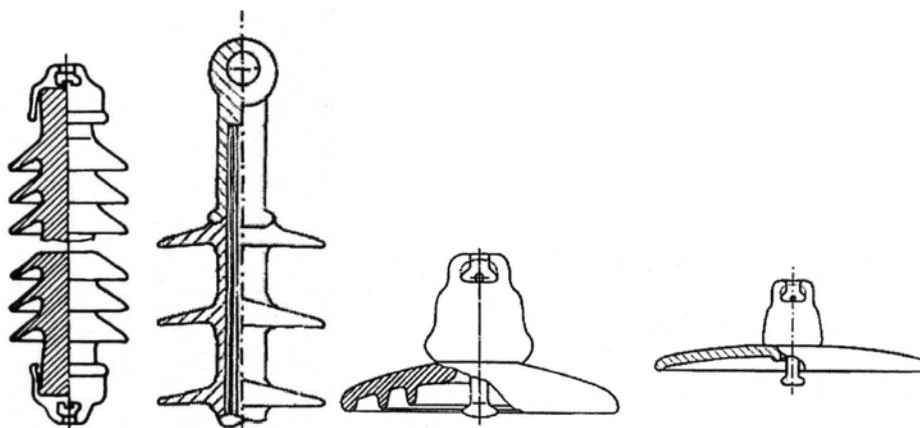
Proračuni i mjerenja pokazuju kako je najveće mehaničko opterećenje vodiča upravo na mjestu spoja sa stezaljkama. Uz statičku silu koja je kombinacija reakcije zatezne sile vodiča i mase užeta, javlja se i dinamička sila zbog eolskih vibracija.

Ako uz to uzmemo u obzir ostala spomenuta opterećenja kojima su izloženi vodiči, a time i zatezne stezaljke, električna, kemijska i toplinska, jasno se vidi važnost korištenja kvalitetnih zateznih kompresijskih stezaljki.

2.2.3 Izolatorski lanci

Izolatori kod nadzemnih elektroenergetskih vodova služe za:

- električnu izolaciju vodiča od stupova,
- mehaničko fiksiranje vodiča u odnosu na stup i osiguranje razmaka među vodičima prijenosom sila iz vodiča na stup.



Slika 5. Izolatorski lanci [3]



Slika 6. Izolatorski lanci od kaljenog stakla [1]

Slika 5 prikazuje neke česte izvedbe izolatora: keramički „longrod“, kompozitni i člankasti stakleni i aerodinamični izolator.

Slika 6 prikazuje često korištene staklene izolatorske članke.

Za visokonaponske i srednjenaponske vodove se koristi izolacija pomoću izolatorskih lanaca.

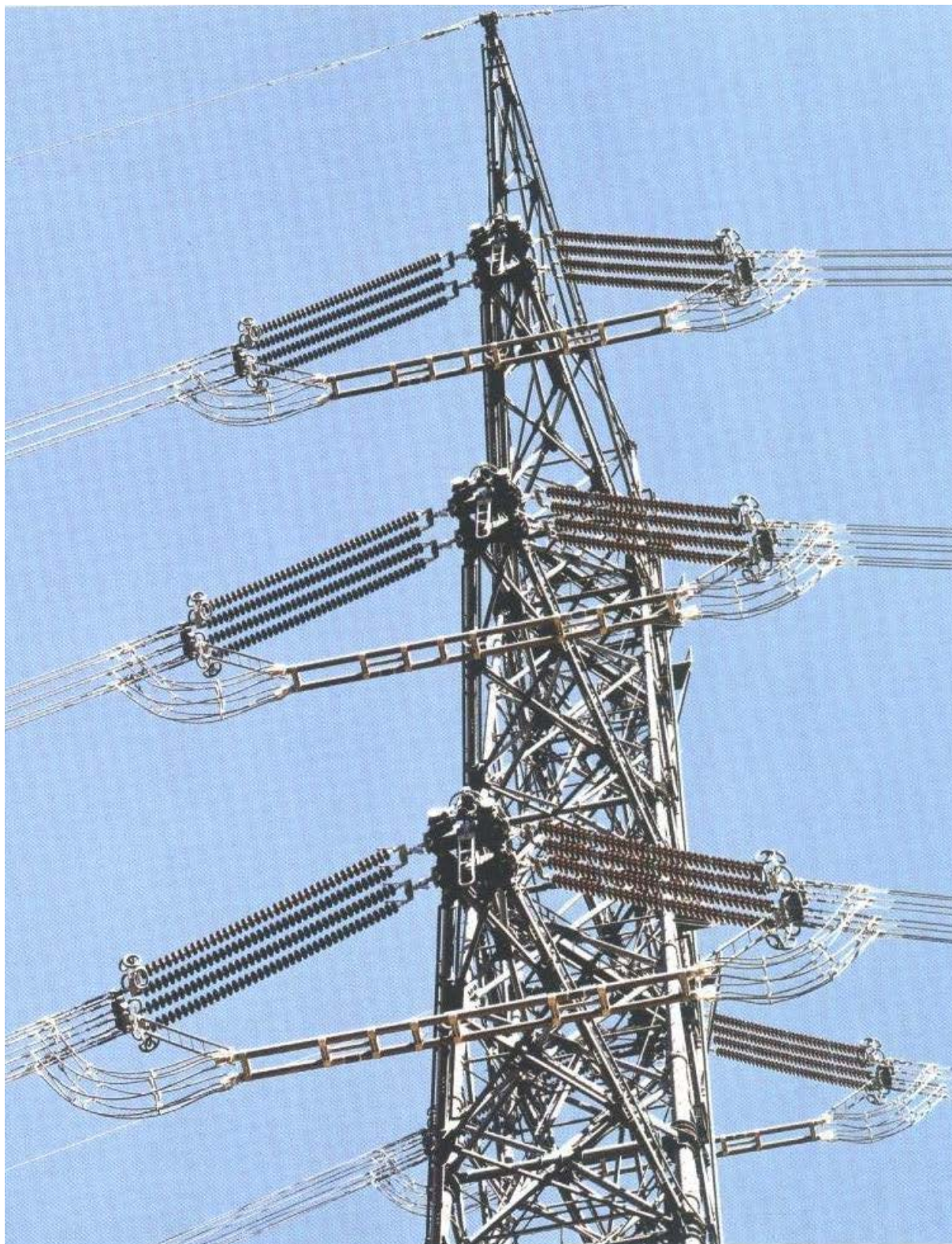
Izolatorski lanac je gibljivi, vlačno napregnuti sklop koji se sastoji od slijedećih elemenata:

- izolator sa standardnom zglobnom vezom (člankasti, štapni; prema materijalu: keramički, stakleni, kompozitni),
- ovjesni pribor (nosne ili zatezne stezaljke, spojni elementi za spoj sa stupom, spojni elementi sa standardnom zglobnom vezom za spoj s izolatorom, odstoynici, produžnici i dr.)
- zaštitni pribor, za električnu i mehaničku zaštitu (rogovi i prsteni za lokalno rasterećenje od prenapona; prigušivači vibracija, odstoynici vodiča, dodatni utezi).

Vrste izolatorskih lanaca prema namjeni:

- nosni – nalaze se u vertikalnoj ravnini, upotrebljavaju se za povezivanje vodiča s nosnim stupovima, preuzimaju vertikalnu komponentu sile vodiča koja se uglavnom sastoji do težine vodiča i opreme, osiguravaju projektirani provjes odnosno visinu vodiča od zemlje,
- zatezni – nalaze se skoro horizontalno, kao da su produžetak vodiča, preuzimaju cjelokupni nateg vodiča, dimenzionirani su da podnesu prekid svih užeta s jedne strane stupa kod maksimalnog opterećenja užeta.
- specijalni: preplitajni, razne varijacije za korištenje u trafostanicama, elektroenergetskim postrojenjima, itd.

Za učvršćivanje zaštitnog užeta se koriste zavješnja (nosna ili zatezna) postavljena na vrhu stupa, čiji su osnovni element nosne odnosno zatezne stezaljke.

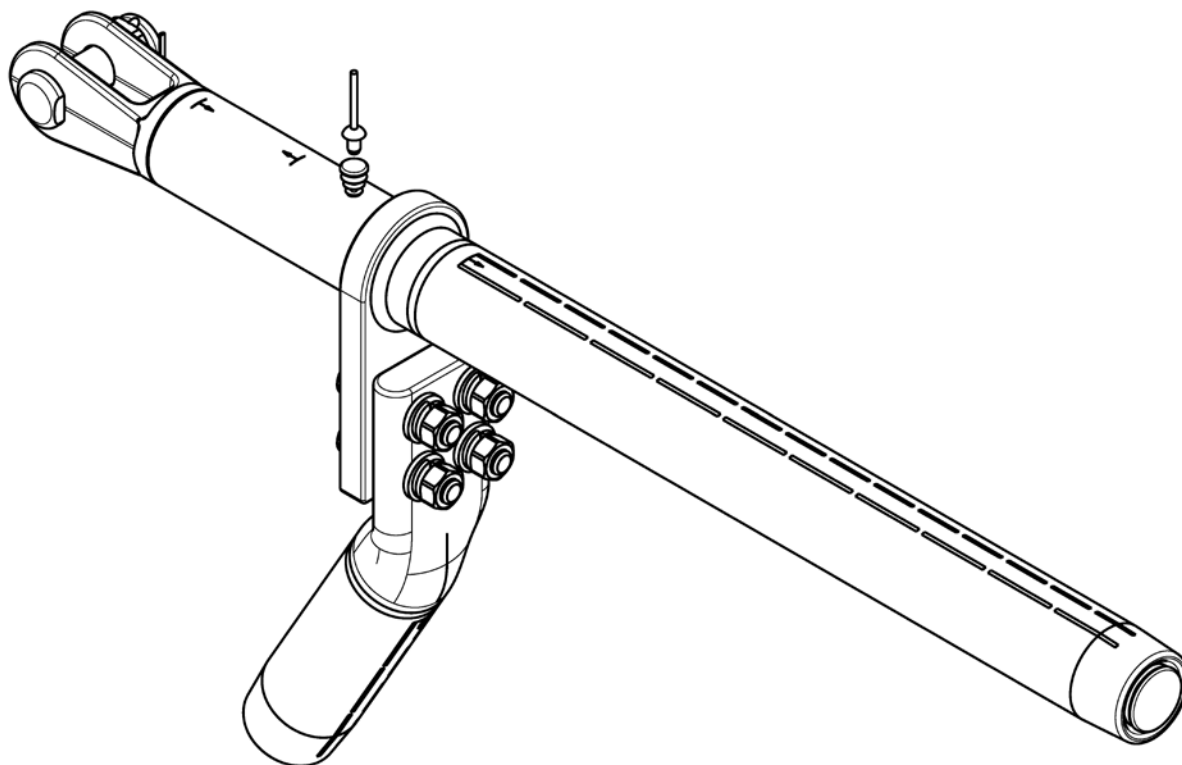


Slika 7. Zatezni izolatorski lanci na 1000 kV vodu (Japan)

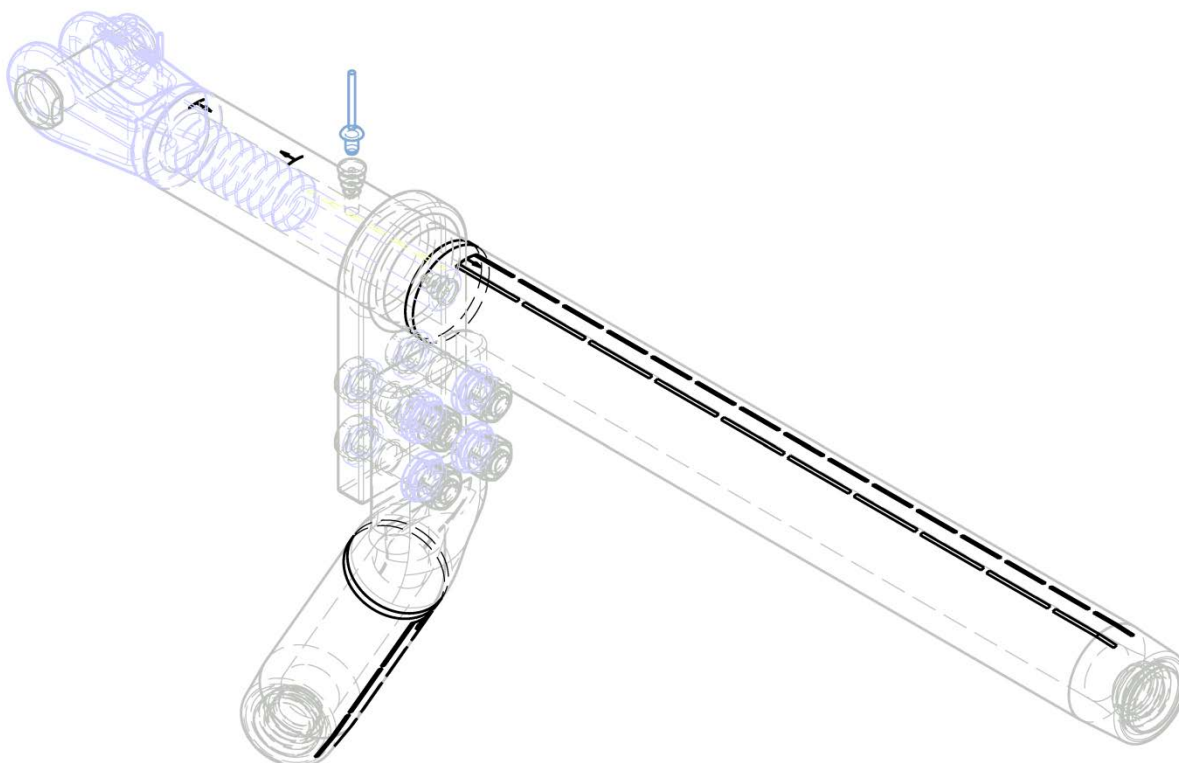
2.3 Aluminijske zatezne kompresijske stezaljke

Iz prethodnih razmatranja u ovom poglavlju, dolazi se do inženjerskih zahtjeva koji utječu na oblikovanje i tehnologiju izrade aluminijskih zateznih kompresijskih stezaljki:

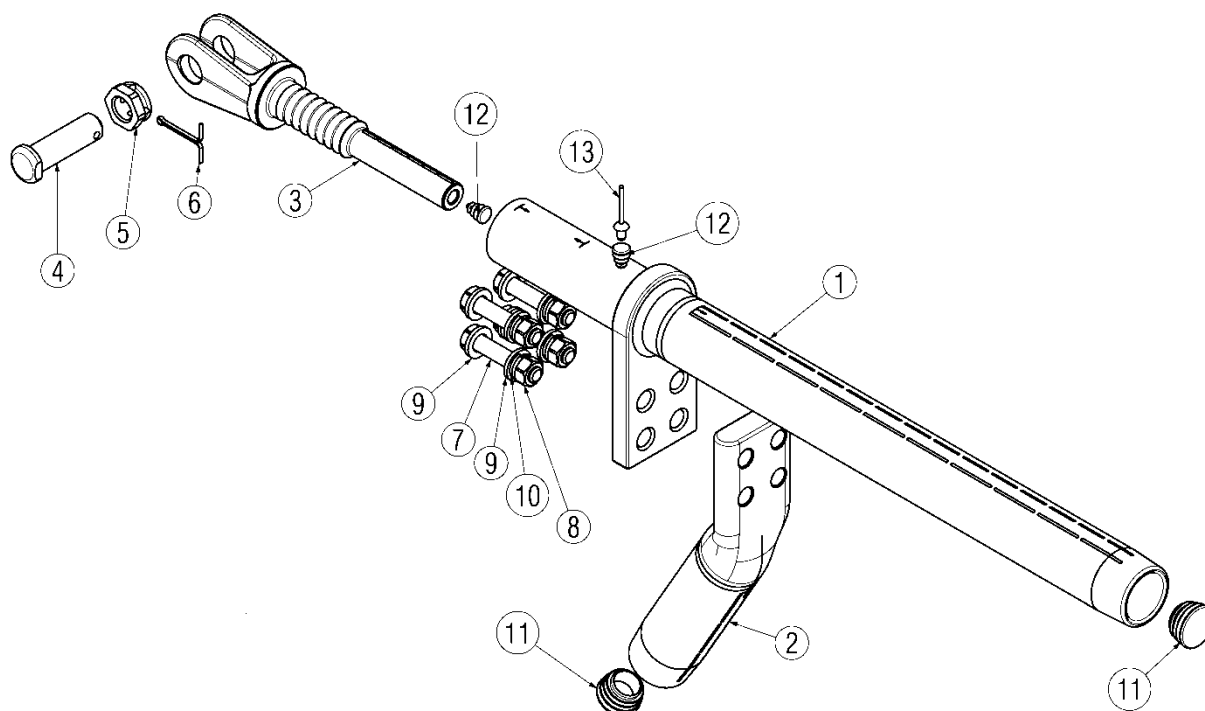
- **Potrebe tržišta za velikim količinama.** Samo Hrvatska ima skoro 7500 km viskonaponskih i srednjenaponskih dalekovoda. Zemlje u razvoju ubrzano grade dalekovode. Visoko razvijene zemlje su primorane proširivati kapacitete elektroenergetskog sustava i zamjenjivati stare vodove.
Pošto se radi o nerastavljivom spoju, treba osigurati određenu količinu stezaljki za održavanje.
- **Varijantnost.** Odabir vodiča ovisi o električnim i mehaničkim zahtjevima nad elektroenergetskim vodom. Stezaljke za njih su različitih dimenzijama, i za neke uvjete različitog oblika, ali dovoljno sličnog kako bi se mogle grupirati zajedno.
- **Mehaničko opterećenje.** Vodiči se potpuno rasterećuju od natega preko zateznih stezaljki. Uz to postoji dinamičko mehaničko opterećenje zbog eolskih vibracija. Normalne izvedbe zateznih stezaljki se predviđaju za rad na temperaturama od 80 °C. Postoje izvedbe za rad na povišenim temperaturama. Zagrijavanje se dešava zbog pojave Jouleove topline. Stezaljka mora imati dovoljnu čvrstoću da bi podnijela ta opterećenja.
- **Električno opterećenje.** Ono je visoko i proizlazi iz osnovne funkcije elektroenergetskih mreža. Određuje dobre električne karakteristike materijala izrade stezaljki i adekvatno oblikovanje radi prijenosa električne struje.
- **Rad pod visokim naponom.** Postoji opasnost od pojave korone, tj. lokalnog iskrenja koje se očituje u oštećenju materijala, električnim gubicima i smetnjama u cijelom spektru frekvencija, od radio interferencije, preko bučnog rada, do vidljivih električnih izboja. Pravilnim oblikovanjem treba spriječiti gomilanje električnih naboja.
- **Kemijsko opterećenje.** Stezaljke rade električki i mehanički opterećene izložene onečišćenom zraku i izložene su cijelom spektru atmosferskih utjecaja. Moraju imati dobru postojanost materijala.
- **Duktilnost.** Kompresijske stezaljke se ugrađuju prešanjem pomoću specijalnih alata. Zbog toga, osim adekvatne čvrstoće, moraju biti dovoljno duktilne kako ne bi otežavale ionako skupu montažu na terenu.



Slika 8. Model zatezne kompresijske stezaljke, izometrijski prikaz



Slika 9. Model zatezne kompresijske stezaljke, izometrijski prikaz s vidljivim sakrivenim linijama



Slika 10. Prikaz dijelova zatezne kompresijske stezaljke

Tablica 2. Dijelovi zatezne kompresijske stezaljke

Poz.	Naziv	Kom.
1	Tijelo kompresijske stezaljke	1
2	Priključna stezaljka	1
3	Vilica s tijelom	1
4	Vijak (ISO 898-1)	1
5	Matica	1
6	Rascjepka	1
7	Vijak	4
8	Matica	4
9	Podložna pločica	8
10	Elastična podloška	4
11	Čep za cijev	3
12	Čep za cijev	2
13	Blok zakovica	1

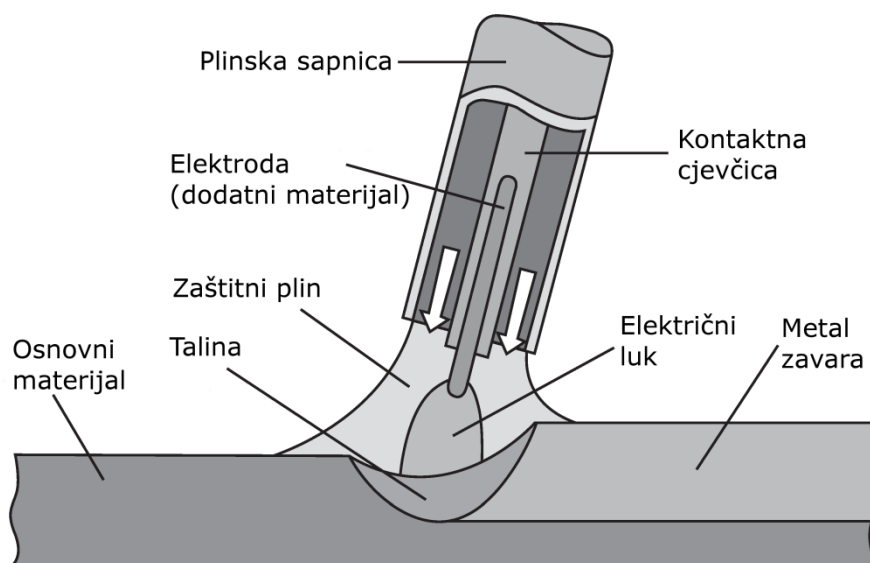
Slika 8, Slika 9, Slika 10 i Tablica 2 prikazuju izgled i dijelove aluminijске zatezne kompresijske stezaljke za aluminijско užе s čeličnom jezgrom.

3. MIG ZAVARIVANJE

Prema HRN EN ISO 4063:2012 oznaka postupka MIG zavarivanja je 131.

MIG (Metal Inert Gas) postupak zavarivanja koristi toplinu iz električnog luka za taljenje potrošne elektrode i osnovnog materijala izratka za zavarivanje. Ono se vrši pod zaštitom inertnog plina. Jaka struja uzrokuje taljenje vrha elektrode, koji se prenosi na izradak. Elektroda je žica koja se automatski dodaje s namotaja u električni luk kontroliranom brzinom i istovremeno ima ulogu dodatnog materijala. Brzina dodavanja žice je osnovni parametar MIG zavarivanja.

Za optimalni postupak zavarivanja bitno je pravilno odabrati parametre zavarivanja. Osim brzine dodavanja žice, tipični parametri za MIG zavarivanje su napon i protok zaštitnog plina.



Slika 11. Osnovne značajke procesa MIG zavarivanja [4]

Električni luk se uspostavlja između radnog komada i žice koja se kontinuirano dodaje s koluta sustavom za dobavu žice pomoću valjčića koji guraju žicu kroz cjevčicu u savitljivi kabel na čijem kraju se nalazi pištolj za zavarivanje. Energija za električni luk se osigurava pomoću izvora struje za zavarivanje. Struja se prenosi na elektrodu pomoću kontaktne cjevčice u pištolju za zavarivanje, (Slika 11). Ona je u većini slučajeva spojena na pozitivni pol izvora struje. Tada se radni komad spaja na negativni pol, te se prilikom uspostavljanja

električnog luka zatvara strujni krug.

Žica malog promjera, veličine između 0,6 i 2,4 mm se dobavlja pomoću sustava za dodavanje žice brzinom od nekoliko metara u minuti. Korištenjem izvora s ravnom karakteristikom se automatski regulira duljina električnog luka, u zavisnosti od namještenog napona zavarivanja.

Zaštitni plin štiti elektrodu, električni luk i rastaljeni metal od utjecaja okolišne atmosfere. Zaštitni plin struji kroz sapnicu koja okružuje kontaktnu cjevčicu. Kod MIG zavarivanja koristi se inertni plin, koji ne sudjeluje u procesima koji se odvijaju u rastaljenom metalu zavora.

„Ručno“ MIG zavarivanje se naziva poluautomatskim postupkom jer se žica dodaje automatski, dok zavarivač ručno vodi pištolj za zavarivanje.

Zavarivač utječe na sljedeće parametre prije i tokom zavarivanja:

- Bira vrstu zaštitnog plina, vrstu i promjer žice, napon i struju preko brzine dodavanja žice
- Kontinuirano regulira varijable procesa gledajući talinu i slušajući zvuk koji proizvodi električni luk
- Održava pištolj za zavarivanje u točnom položaju precizno i stabilno, što je osnovno za dobivanje dobrog zavora konstantne kvalitete

MIG zavarivanje se često automatizira mehaniziranjem vođenja pištolja za zavarivanje. Međutim, kako je već spomenuto, to nije jedini zadatak zavarivača. Posljedično, uloga automatizacije je reproduciranje vještina iskusnog zavarivača u smislu pozicioniranja pištolja za zavarivanje i kontroliranja parametara zavarivanja. Među ostalim, to podrazumijeva promatranje procesa u toku i podešavanje ili prilagođavanje parametara u skladu sa željenim rezultatima. Ključnu ulogu u ostvarivanju tog zadatka imaju senzori, odnosno njihove informacije koje se koriste kao povratna veza u procesu.

Stabilnost procesa MIG zavarivanja je vrlo osjetljiva u odnosu na glavne parametre zavarivanja, posebno *jakost struje, napon, brzinu dodavanja žice, slobodnu duljinu žice, vrstu i protok zaštitnog plina i induktivitet*. Mala promjena udaljenosti pištolja i izratka može uzrokovati znatnu varijaciju struje i napona, koji određuju način prijenosa materijala i tako utječu na kvalitetu zavora. Ako električni luk nije stabilan, mogu se javiti greške zavora kao što su loša penetracija, ugorine ili veliko štrcanje materijala.

Najznačajnije prednosti MIG zavarivanja su visoka produktivnost i mogućnost zavarivanja uz relativno mali unos topline u radni komad, u kombinaciji s olakšanom mogućnošću

automatizacije.

MIG zavarivanje je fleksibilna metoda te ima širok spektar primjena u zavarivanju [5]:

- limova debljine od 0.5 mm na dalje. Mogućnost odabira parametara za nizak unos topline omogućuju minimiziranje deformacija. Nasuprot tome, kod zavarivanja debelih materijala može se postići visoka produktivnost.
- zavarivanja svih uobičajenih konstrukcijskih materijala,
- spajanja prevučenih metala,
- zavarivanje u svim položajima.

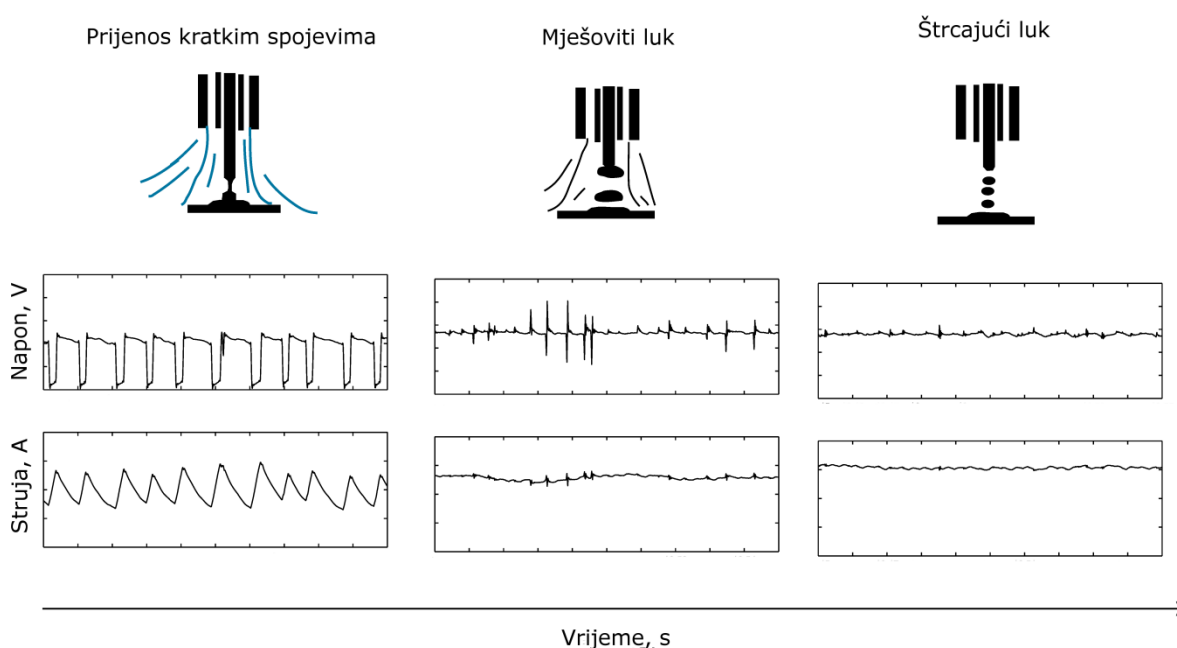
Nedostaci MIG zavarivanja su:

- složenija oprema u odnosu na REL postupak, što je čini skupljom i manje portabilnom,
- otežano korištenje na otvorenom prostoru, treba zaštititi mjesto zavarivanja od propuha kako ne bi otpuhnuo zaštitni plin,
- dimenzije pištolja za zavarivanje mogu uzrokovati smanjenu mogućnost pristupa zavaru.

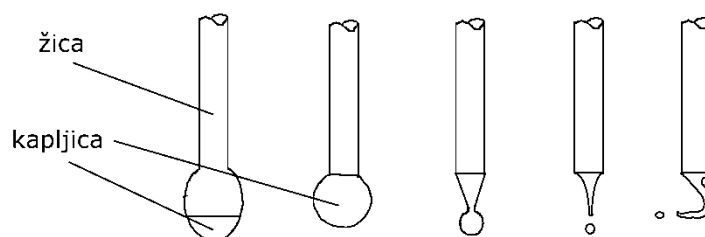
3.1 Načini prijenosa metala kod MIG zavarivanja

Važna značajka MIG postupka zavarivanja je mogućnost odabira načina prijenosa metala izborom odgovarajućih parametara zavarivanja.

MIG postupkom se može ostvariti prijenos materijala na četiri načina: kratkim spojevima, mješovitim prijenosom i štrcajućim lukom, te impulsni način prijenosa metala, „umjetno stvoreni“ razvojem novih i modernih izvora struje koji omogućavaju osciliranje jakosti struje u kratkom vremenskom periodu. Način prijenosa metala je, među ostalim funkcija struje i napona zavarivanja.

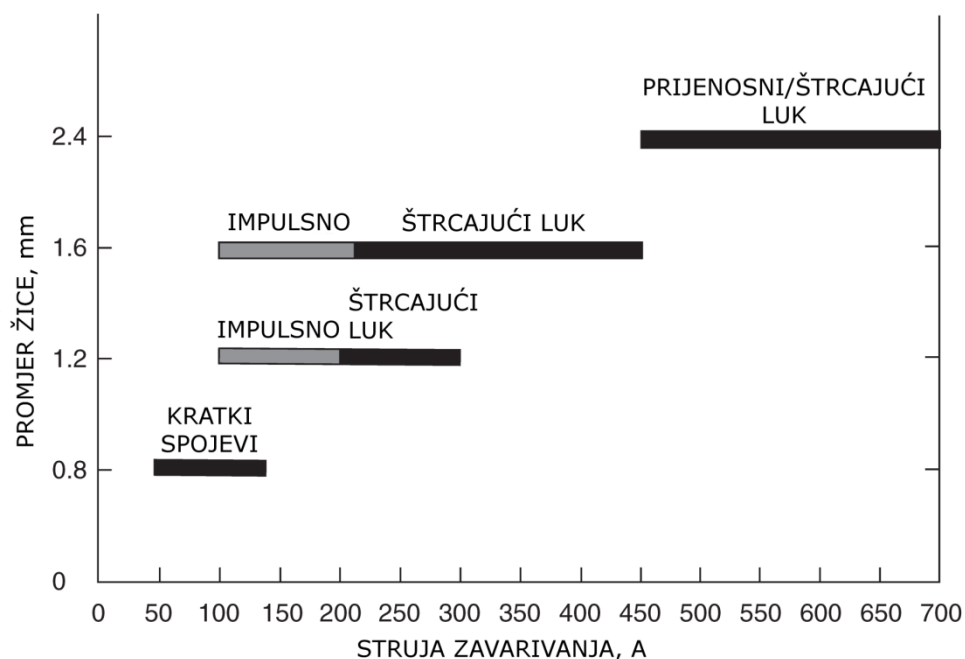


Slika 12. Oscilogrami struje i napona za različite načine prijenosa metala [6]



Slika 13. Načini prijenosa metala ovisno o struji zavarivanja [6]

Slika 12 prikazuje ovisnost napona o vremenu i struje o vremenu kod različitih vrsta prijenosa metala. Slika 13 prikazuje veličinu kapljice u odnosu na struju zavarivanja, odnosno način prijenosa metala, od prijenosa kratkih spojeva, preko mješovitog i štrcajućeg luka, do vrtložnog luka za velike struje zavarivanja.



Slika 14. Odnos struje zavarivanja i promjera žice [7]

Slika 14 prikazuje najčešće načine prijenosa metala za određene debljine žice za zavarivanje s naznačenim tipičnim rasponima struje zavarivanja.

3.1.1 Prijenos kratkim spojevima

Kod zavarivanja kratkim spojevima je struja, dakle i unos topline manji nego kod štrcajućeg luka. Zbog toga se mogu zavarivati tanji materijali. Međutim, smanjuje se količina nataljenog metala, tj. proizvodnost.

Okvirni parametri za prijenos kratkim spojevima su napon luka 13 V do 21 V, jakost struje zavarivanja 50 A do 170 A. [4]

Izvor struje je upravljan naponom, što znači kako izvor kontinuirano mijenja jakost struje kako bi održao konstantni napon na izlazu.

Ciklus kratkih spojeva počinje s uspostavljanjem električnog luka između vrha žice i izratka. Žica se tali i na vrhu se stvara mala kapljica. Taj dio ciklusa se naziva „vrijeme luka“.

Za vremena kratkog spoja, kapljica na vrhu žice dodiruje talinu zavora. U tom trenutku električni luk se gasi i napon pada praktički na nulu, dok struja raste na maksimalnu vrijednost. Zbog toga se stvara suženje na talini koja čini most između žice i taline zavora. Na kraju se komadić taline odvaja s vrha žice i prenosi se u talinu zavora gravitacijskom silom i tzv. „pinch“ efektom. Nakon toga se ponovno uspostavlja električni luk i proces se ponavlja.

Eksperimentalno je određeno kako stabilnost prijenosa metala nastupa kad se frekvencija kratkih spojeva izjednači s frekvencijom oscilacije taline zavara, koja je pak uglavnom određena širinom zavara. [6] Dakle, za proces optimalne stabilnosti, učestalost kratkih spojeva treba biti sinkronizirana s oscilacijama taline zavara, što u praksi iznosi 50 – 100 Hz.

3.1.2 Prijenos štrcajućim lukom

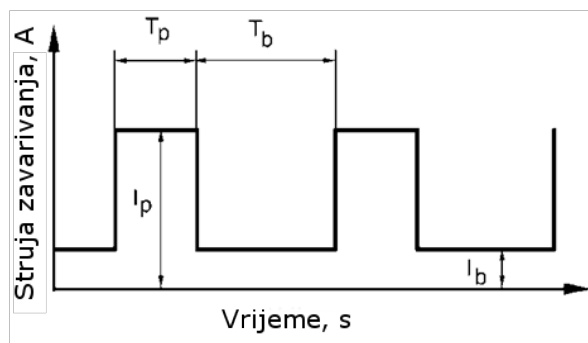
Kod ovog načina prijenosa materijala, kapljice metala su manje ili jednake od promjera žice. Unos topline je velik, stoga zavar ima dobru penetraciju. S druge strane, zbog toga nastaje veliko područje taline kod zavarivanja, što je otežano kontrolirati. Nemodificiran način je prikladan za položeni i horizontalni položaj zavarivanja i deblje osnovne materijale.

Okvirni parametri za prienos štrcajućim lukom su napon luka 25 V do 40 V, jakost struje zavarivanja obično 200 A do 600 A. [4]

Standardni izvori struje nemaju ravnu karakteristiku već blago padajuću, tj. napon blago pada povećanjem struje. Time je postignut luk konstantne duljine tokom zavarivanja, tzv. samoprilagođavajući luk. Kada se udaljenost od izratka do kontaktne vodilice poveća, duljina luka se također poveća. Treba naglasiti kako se zbog takve karakteristike izvora, pri maloj promjeni napona, struja značajno promijeni. Smanjenjem struje dolazi do sporijeg taljenja žice, što rezultira automatskom prilagodbom duljine luka prema stabilnoj radnoj točki. Smanjenje duljine luka ima suprotan učinak. To upućuje na to kako se promjena udaljenosti između kontaktne vodilice i izratka gotovo u potpunosti odražava u promjeni duljine slobodnog kraja žice.

Promjenom struje se ne mijenja samo način prijenosa metala. Ona također utječe na širinu i dubinu penetracije zavara, brzinu taljenja žice i stabilnost električnog luka. Prema tome, poželjna je konstantna i stabilna srednja vrijednost struje. Kao što je već naglašeno, struju nije lako kontrolirati jer male promjene napona rezultiraju velikim promjenama struje zbog karakteristike izvora struje.

3.1.3 Impulsno MIG zavarivanje



Slika 15. Izgled oscilograma impulsnog strujnog zavarivanja [6]

Slika 15 ilustrira promjenu struje zavarivanja u dvije razine tokom vremena, princip na kojem se osniva impulsno zavarivanje. Vrijednost I_p predstavlja vršnu struju, I_b osnovnu struju, te T_p i T_b vremena vršne, odnosno osnovne struje.

Prednost ovog procesa je što su srednja struja, a posljedično i unos topline, manji nego kod zavarivanja štrcajućim lukom. Zahvaljujući tome se mogu zavarivati i tanji materijali. Istovremeno, može se postići količina nataljenog metala kao i kod štrcajućeg luka.

Parametre je moguće bolje definirati prema zavaru koji se izrađuje, odnosno osnovnom materijalu, u odnosu na ostale načine prijenosa metala. Obično se koriste naponi 18 V do 25 V i nešto niže srednje struje od onih koje bi koristili za zavarivanje štrcajućim lukom za istu žicu.

Osnovna struja, odnosno struja držanja se koristi kao parametar za ograničavanje unosa topline. Ona mora biti dovoljno visoka da se održi stabilan luk, a opet ne previsoka kako ne bi električni luk „lutao“ po osnovnom materijalu. Određuje ju empirijski koeficijent K_1 . Za vrijeme vršne struje elektroda se tali i po jedna kapljica se prenosi u zavar. Glavna sila koja ostvaruje prijenos metala je elektromagnetska sila, dok gravitacijska sila ima u tome sekundarnu ulogu. Pri tome je kriterij za odvajanje jedne kapljice slijedeći [6]:

$$I_p^n \cdot T_p = K_2$$

Pri tome je K_2 konstanta ovisna o materijalu, a $n \approx 2$. [6]

Treba izbjegavati mješoviti prijenos metala, tj. promjer kuglice mora biti manji od promjera žice. Približni volumen kuglice se može izračunati jednadžbom [6]:

$$D_V = K_3 A (I_p T_p + I_b T_b)$$

Pri tome je K_3 konstanta, A površina poprečnog presjeka žice u mm^2 . Brzina dodavanja žice W_f mora odgovarati brzini taljenja žice W_b kako bi se osigurala konstantna duljina električnog luka.

Kako bi se izbjegle ugorine i greške dobave žice, srednja struja zavarivanja treba biti:

$$I_m = \frac{I_p \cdot T_p + I_b \cdot T_b}{T_b + T_p}$$

Brzina taljenja žice je određena izrazom:

$$W_b = K_4 \cdot I_m + K_5 \cdot I_m^2 \cdot l_e$$

Pri tome su K_4 i K_5 empirijske konstante vezane uz korišteni materijal i dimenzije. Prvi izraz opisuje taljenje zbog topline vrha žice, a drugi Jouleovo zagrijavanje slobodnog kraja žice (l_e) zbog struje zavarivanja.

3.1.4 Sinergijsko upravljanje

Izbor optimalnih parametara impulsnog zavarivanja (W_f , I_p , I_b , T_p i T_b) metodom pokušaja i pogrešaka je dugotrajan proces. Stoga proizvođači izvora struje zavarivanja koriste sinergijsko upravljanje kako bi korisniku pojednostavili izbor parametara. Zavarivač bira samo jedan parametar, npr. brzinu dodavanja žice, a ostale parametre stroj određuje automatski na optimalne vrijednosti.

Kriteriji optimalnosti su [6]:

1. Stabilnost električnog luka: osnovna struja mora biti dovoljno jaka za osiguravanje stabilnog luka,
2. Prijenos metala: osiguravanje prijenosa metala
3. Duljina luka: mora se održavati konstantna duljina električnog luka.

Prijenos štrcajućim lukom se osigurava moduliranjem struje na razne načine uz održavanje određene vrijednosti srednje struje.

Duljina električnog luka (l_a) se procjenjuje mjerenjem napona zavara [6]:

$$U_a = K_5 + \beta_4 \cdot I_a$$

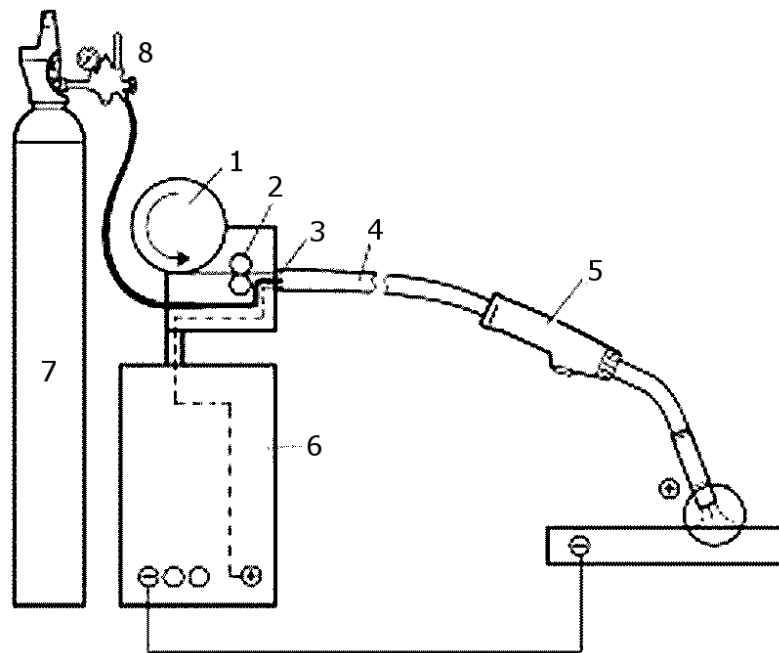
Pri tome je K_5 funkcija struje, a β_4 empirijska konstanta.

Promjena duljine električnog luka uzrokuje promjenu napona luka, koji se mjeri kako bi se procijenila duljina električnog luka. Tako se može izgraditi regulacijski sustav koji održava duljinu luka konstantnom.

Brzina taljenja žice se može regulirati promjenom srednje struje zavarivanja. Tako se može uskladiti brzina taljenja žice s brzinom dodavanja žice u cilju održavanja konstantne duljine električnog luka.

Parametri za mjerenje i praćenje kod impulsnog MIG procesa su prednamještene vrijednosti procesa: I_p , I_b , U_p , U_b , T_p , T_b . Mjerni sustav također mora detektirati neprihvatljive varijacije parametara zavarivanja koji mogu dovesti do greške u zavaru.

3.2 Oprema za MIG zavarivanje



Slika 16. Oprema za MIG zavarivanje

Slika 16 prikazuje osnovnu opremu za MIG zavarivanje:

1. kolut žice (dodatni materijal i elektroda),
2. sustav za dobavu žice,
3. elektromagnetski ventil za plin,
4. fleksibilni kabelski paket,
5. pištolj za zavarivanje,
6. izvor struje za zavarivanje i upravljački sustav,
7. spremnik zaštitnog plina,
8. regulacijski ventil za zaštitni plin.

3.3 Izvor struje za zavarivanje

Osnovni zadatak izvora struje za zavarivanje je osigurati struju određene jačine i napona koji će omogućavati stabilan električni luk i njegovo lako uspostavljanje.

U procesu zavarivanja se koristi električna struja visokih jakosti i relativno niskih napona. U komercijalnoj elektroenergetskoj mreži, koja se najčešće koristi za elektrolučno zavarivanje je odnos veličina jakosti struje i napona upravo obrnut. Zbog toga se mora koristiti uređaj za pretvorbu tih odnosa.

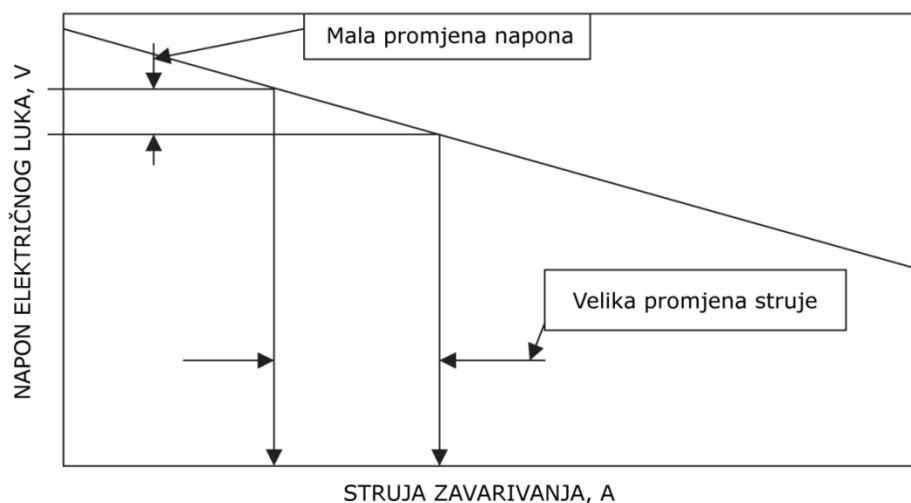
Za MIG zavarivanje se u pravilu koristi istosmjerna struja s elektrodom spojenom na plus pol. Pri tome je važan i odnos struje i napona zavarivanja, koji se naziva *statička karakteristika izvora struje za zavarivanje*.

Za stabilan proces, u optimalnim radnim uvjetima, treba biti ispunjen uvjet:

$$v_t = v_z$$

Brzina taljenja žice (v_t) je jednaka brzini dodavanja žice (v_z), koja je određena tehnološkim parametrima zavarivanja i konstantna, odnosno električnim lukom se rastali onoliko žice koliko je se dodaje. U protivnom se dobije nestabilan električni luk i nejednolika kvaliteta zavara.

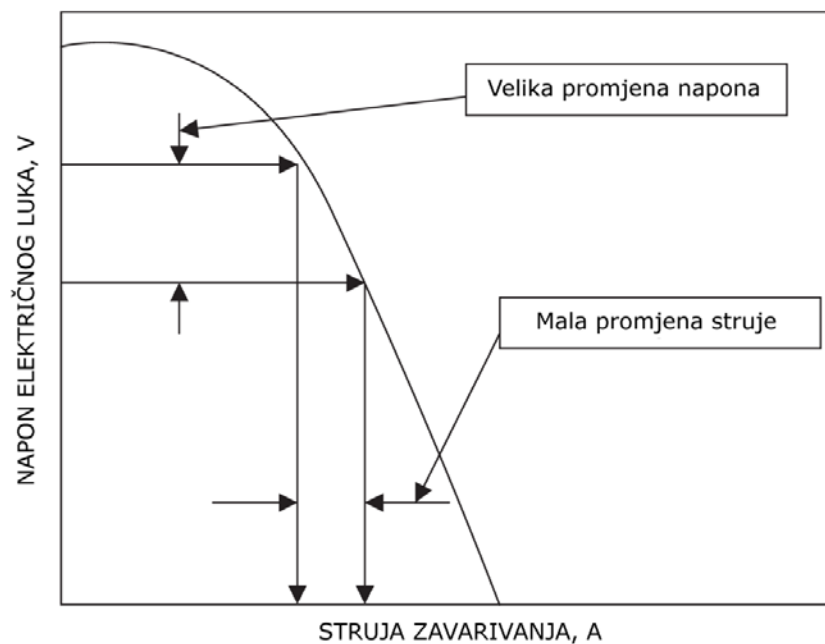
U većini slučajeva, za MIG zavarivanje se koriste izvori s *ravnom karakteristikom*. [7]



Slika 17. Blago padajuća karakteristika izvora struje za zavarivanje [7]

Slika 17 shematski prikazuje blago padajuću karakteristiku izvora struje. Takav odnos omogućuje veliku promjenu struje zavarivanja pri maloj promjeni napona električnog luka. Takva karakteristika se naziva i *ravna statička karakteristika*, pad napona od 2-5 V / 100 A se smatra normalnim. [5]

Takva karakteristika je osnova za *unutarnju regulaciju duljine električnog luka*. Pošto je brzina dodavanja žice (v_z) konstantna, ako dođe do poremećaja zbog pomaka ruke zavarivača, deformacije lima itd., duljina luka se naglo promjeni, što znači da se napon luka naglo promjeni i u tom trenutku nastaje neravnoteža. Ravna ili blago padajuća karakteristika izvora automatski uzrokuje promjenu struje zavarivanja koja ima za posljedicu promjenu brzine taljenja žice i primicanje ili odmicanje žice od taline, prilikom čega se mijenja napon električnog luka, potom struja i brzina taljenja žice, te se ponovno uspostavlja ravnoteža.

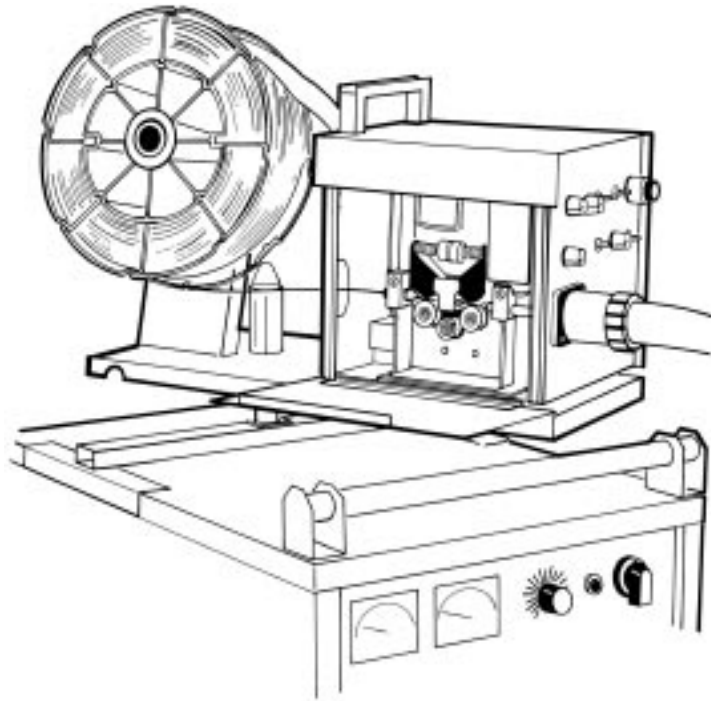


Slika 18. Padajuća karakteristika karakteristika izvora struje zavarivanja [7]

Za MIG zavarivanje aluminija se vrlo rijetko koristi i strmo padajuća karakteristika izvora, koja je uobičajena kod REL (111) i TIG (141) postupaka zavarivanja. [7]

Velike razlike napona električnog luka uzrokuju tek male razlike struje zavarivanja. Posljedično, promjene unosa topline su manje nego kod ravne karakteristike, što daje ravnomjerniju penetraciju zavara.

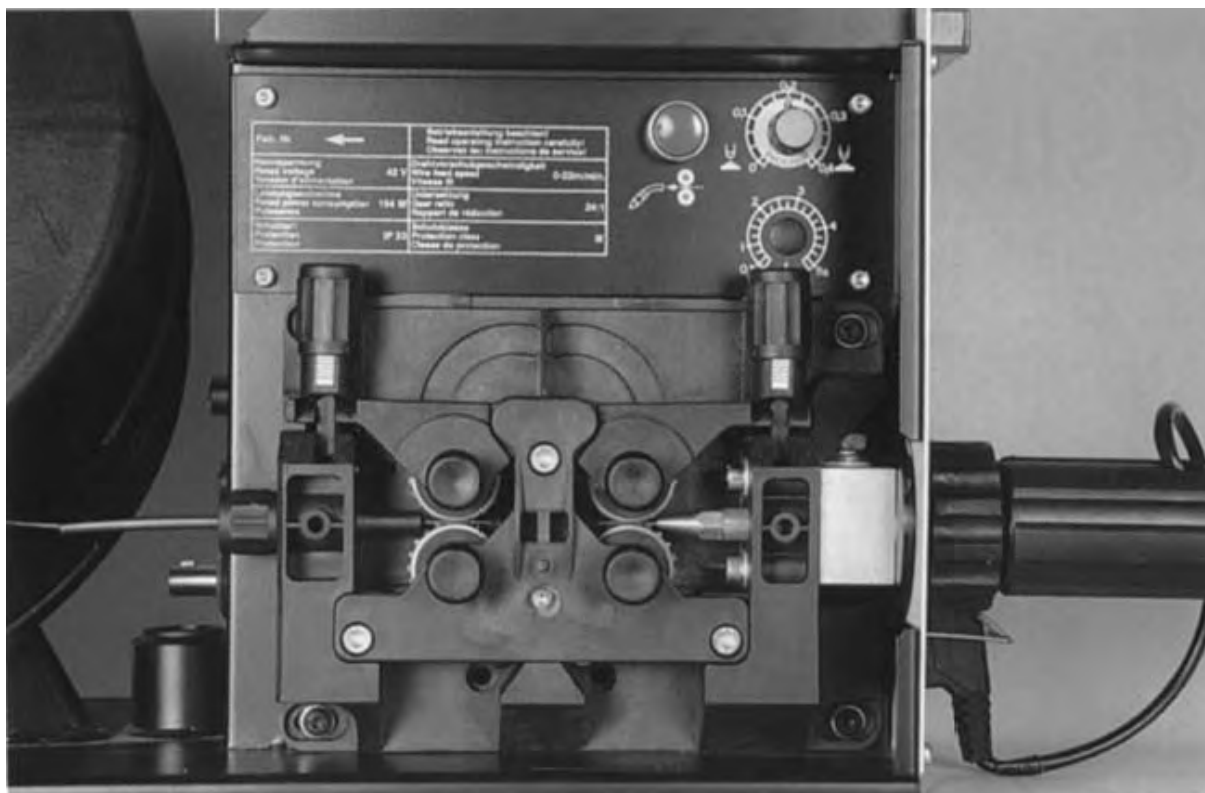
3.3.1 Sustav za dobavu žice za zavarivanje



Slika 19. Uređaj za dodavanje žice i kolut žice [5]

Dodatni materijal za MIG zavarivanje je u obliku žice i kontinuirano se dodaje pomoću sustava za dobavu žice. Brzina dodavanja mora biti promjenjiva jer je osnovni parametar MIG zavarivanja. Za razliku od npr. sustava za dodavanje žice koji se koristi kod TIG zavarivanja, za MIG postupak je žica ujedno i elektroda za zavarivanje, tj. dio je zavarivačkog strujnog kruga.

Žica se gura kroz fleksibilnu cjevčicu koja je do pet metara duljine- Pri tome se mora osigurati vrlo brz start i zaustavljanje dodavanja, koje pak mora biti čim ravnomjernije, jer varijacije brzine dodavanja direktno utječu na kvalitetu zavara.



Slika 20. Sustav dobave žice za MIG zavarivanje s četiri kotačića [7]

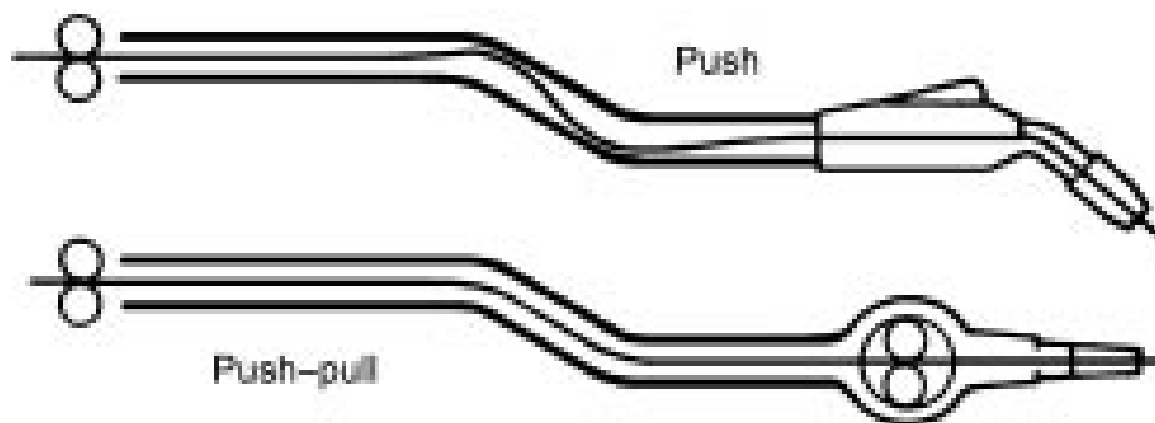
Prema načinu dobave, sustavi za dobavu žice mogu biti (Slika 21):

- „push“ sustav – žica se gura najčešće kroz teflonsku ili spiralnu čeličnu cjevčicu pomoću dva ili četiri kotačića, od kojih su jedan ili dva kotačića pogonjena reguliranim istosmjernim elektromotorom. Kotačići imaju utore u obliku slova U, V ili su nazubljeni (Slika 22), što ovisi o vrsti materijala žice, a dimenzije im ovise o promjeru žice.

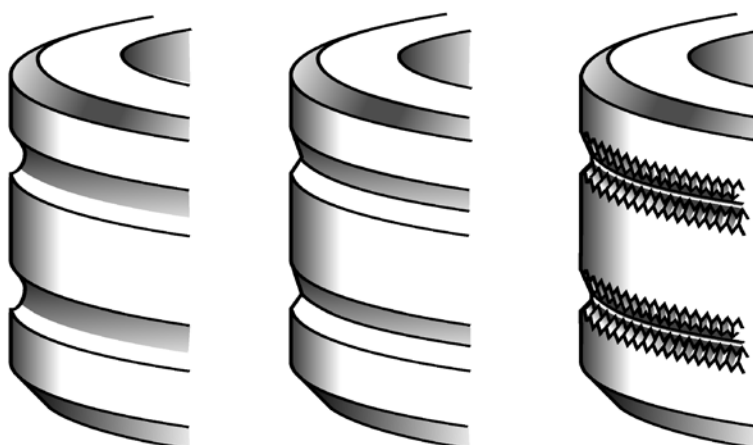
Koristi se za dobavu žice promjera 1.2 – 2.4 mm na udaljenosti do 5 m.

- „push-pull“ sustav – sastoji se sustava kotačića koji gura žicu kroz vodilicu do kotačića koji se nalaze u pištolju za zavarivanje koji istu žicu vuče, a pogoni ih električni ili pneumatski motor. Tako se održava napetost žice.

Ovakav sustav je skup i čini pištolj za zavarivanje glomaznim, ali ima prednosti kod korištenja žica manjih promjera, oko 0.8 mm, kod dobave žice na veću udaljenost, npr. u brodogradilištima, te kod zavarivanja aluminija.



Slika 21. "Push" i "push-pull" način dobave žice za zavarivanje [5]

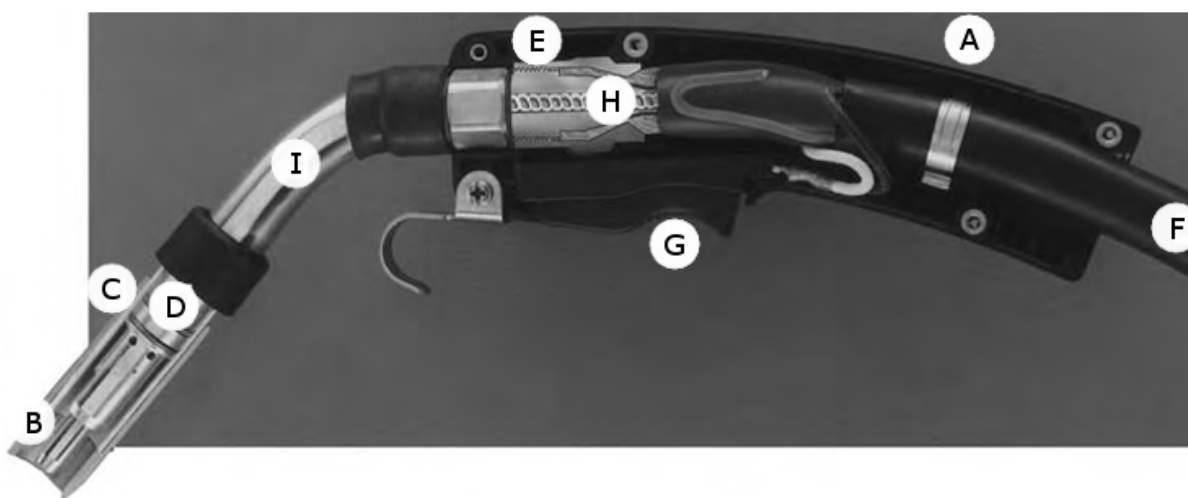


Slika 22. Kotačići za dobavu žice: s U-utorom, V-utorom i nazubljenim utorom [8]

3.3.2 Pištolj za zavarivanje

Pištolj za zavarivanje s fleksibilnim kablom je važan dio opreme za zavarivanje. Dovodi dodatni materijal odnosno žicu za zavarivanje, struju i zaštitni plin u zavarivački električni luk. Mora istovremeno biti čvrst, robustan i lagan i malen kako bi omogućio rad u ograničenom prostoru.

Izvedbe predviđene za struje zavarivanja preko 300 A su hladene vodom, sustavom koji može biti zaseban ili integriran u izvor struje za zavarivanje.



Slika 23. Pištolj za MIG zavarivanje [7]

Slika 23 prikazuje sastavne dijelove tipičnog pištolja za MIG zavarivanje [7]:

- A. ergonomski oblikovana drška,
- B. kontaktna vodilica,
- C. plinska sapnica,
- D. difuzor plina,
- E. konektor energetskog kabla,
- F. uvodnica fleksibilnog kabla koji sadrži plinsku cijev, energetski kabel, upravljački kabel i cjevčicu za dobavu žice za zavarivanje,
- G. prekidač,
- H. zamjenjiva vodilica,
- I. prilagodljiv vrat.

Kontaktna vodilica i plinska sapnica se smatraju potrošnim materijalom, stoga je olakšana njihova izmjena.

3.3.3 Sustav za upravljanje protokom zaštitnog plina

Glavni dijelovi sustava za upravljanje protokom zaštitnog plina su:

- Redukcijski ventil s mjerачem protoka – montira se na bocu za zaštitnim plinom. Regulator protoka omogućuje namještanje protoka plina koji je tehnološki parametar zavarivanja.
- Elektromagnetski ventil – upravljan je upravljačkom jedinicom regulatora brzine dodavanja žice, odnosno upravljačkom logikom izvora struje za zavarivanje. Ovisno o podešenom načinu rada izvora struje, može otvoriti dotok plina tokom dobave žice, ali može započeti dobavu plina i prije i/ili je nastaviti malo nakon zavarivanja.



Slika 24. Redukcijski ventil s mjerачem protoka zaštitnog plina

3.4 Potrošni materijal za MIG zavarivanje

3.4.1 Dodatni materijal – žice za MIG zavarivanje

MIG/MAG postupkom se mogu zavarivati nelegirani, niskolegirani i nehrđajući čelici, aluminij, bakar, bakrene legure, nikal, niklove legure, itd. debljine od 0.5 mm do vrlo velikih debljina. Za svaku vrstu materijala je potrebna odgovarajuća žica, koja obično ima sličan kemijski sastav kao osnovni materijal.

Žice su u katalogima proizvođača dodatnih materijala za zavarivanje prikazane prema međunarodnim i nacionalnim standardima. Kvaliteta namotaja žice na kolut mora biti takva da se žica pri zavarivanju pravilno i jednako odmata s koluta. Površina žice mora biti glatka, točnih dimenzija i uredno namotana na kolute postavljene na uređaj za dodavanje žice.

Žica za zavarivanje se isporučuje u kolutima standardnih dimenzija do 15 kg dodatnog materijala ili u bubnjevima do 1000 kg za visokoproduktivno, automatizirano i robotizirano zavarivanje.



Slika 25. Kolut žice za zavarivanje [8]

Tablica 3. Standardni koluti za zavarivanje [8]

Oznaka	Vanjski promjer (mm)	Širina (mm)	Promjer utora (mm)	Masa žice (kg)
D100	100	45	16,5	1
D200	200	55	50,5	5
D300	300	103	51,5	15



Slika 26. Bubnjevi žice za automatizirano zavarivanje, 250 kg do 1000 kg

Žice za zavarivanje mogu biti:

- pune žice,
- praškom punjene žice.

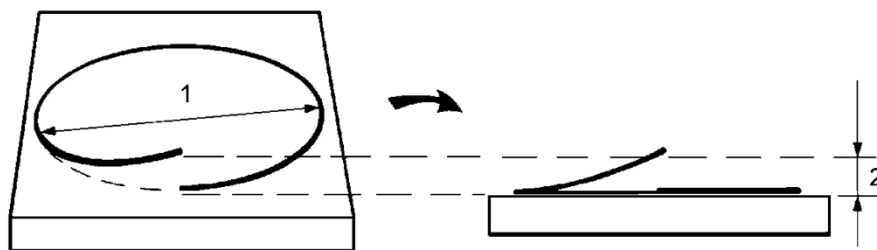
Tablica 4. Standardni promjeri punih i praškom punjenih žica za zavarivanje [8]

Vanjski promjer (mm)	Pune žice	0,6	0,8	1,0	1,2	1,6	2,0	2,4		
	Praškom punjene žice		0,8	1,0	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2

3.4.1.1 Puna žica

Izrađuje se u promjerima od 0,6 – 2,4 mm iz materijala koji odgovaraju osnovnom materijalu. Moraju biti čiste površine i bez grešaka u materijalu. Zbog boljeg kontakta se prevlače s tankim slojem bakra. Bakreni sloj se ne smije odvajati od žice kako ne bi ometao sustav za dobavu žice. Za maksimalnu pouzdanost, npr. kod naprednog robotiziranog zavarivanja, koriste se žice koje nisu pobakrene.

Struja za zavarivanje se prenosi na elektrodu preko kontaktne cjevčice. Radi poboljšanja kontaktne sile i definiranja točke kontakta, žica je zakrivljena, u obliku zavojnice promjera 400 – 1200 mm, (Slika 25)



Slika 27. Provjera promjera i visine zavojnice žice za zavarivanje [5]

3.4.1.2 Praškom punjena žica

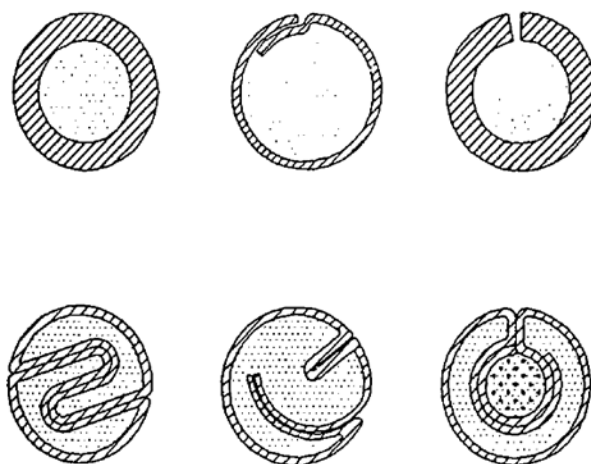
Praškom punjene žice se sastoje od metalnog omotača punjenog praškom za zavarivanje ili metalnim prahom.

Udio praškom punjenih žica u masi depozita zavara ostvarenih MIG/MAG postupkom je 2002. bio 24 % u SAD, 34 % u Japanu i samo 10 % u Europi. [5]

Prednosti praškom punjenih žica su:

- Veća količina nataljenog materijala,
- dobra bočna penetracija
- mogućnost legiranja zavara djelovanjem praška,
- zavarivanje u svim položajima,
- mogućnost korištenja bez zaštitnog plina.

Glavni nedostatak praškom punjenih žica je značajno viša cijena od punih žica i mogući dodatni problemi kod dodavanja žice.



Slika 28. Presjeci praškom punjenih žica [9]

Prema načinu upotrebe, praškom punjene žice mogu biti:

- predviđene za korištenje sa zaštitnim plinovima, najčešće CO₂ ili Ar/CO₂ mješavine,
- za korištenje bez dodatnih zaštitnih plinova – zaštitni plin se razvija iz praška, slično kao kod REL zavarivanja.

3.4.2 Zaštitni plinovi

Zaštitni plinovi prvenstveno služe za zaštitu rastaljenog metala zavora i rastaljenih kapljica koje se prenose kroz električni luk od štetnog utjecaja atmosfere. Uz to utječu na sam proces zavarivanja.

Kod MIG zavarivanja se koriste inertni plinovi (Metal Inert Gas) ili mješavine. Općenito, postoji velik broj mješavina plinova koje ovise o primjeni.

Glavne funkcije zaštitnih plinova su:

- zaštita procesa i materijala od okolišne atmosfere (zraka) – sprječavanje otapanja prvenstveno kisika i dušika iz zraka u zavoru, zaštita površine taline i materijala od oksidacije i nastanka poroznosti,
- utjecaj na proces zavarivanja preko utjecaja na stabilnost luka, produktivnost, pouzdanost, kvalitetu i radni okoliš.

Čimbenici procesa zavarivanja koje zaštitni plinovi poboljšavaju:

- uspostavljanje električnog luka,
- stabilnost električnog luka,
- količina nataljenog metala,
- kvašenje između krutog materijala i taline zavora,
- dubina i oblik penetracije,
- štrcanje materijala.

Svojstva zaštitnih plinova važna za primjenu u zavarivanja su:

- potencijal ionizacije,
- toplinska vodljivost,
- kemijska reaktivnost zaštitnog plina s talinom.

Kod MIG zavarivanja kao zaštitni plinovi se koriste inertni plinovi argon (Ar) i helij (He), te njihove mješavine

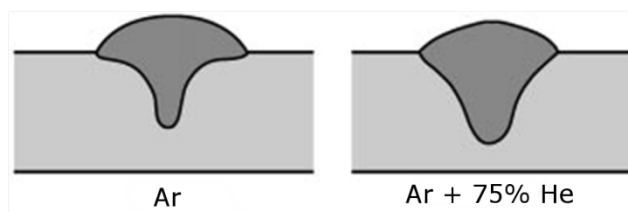
3.4.2.1 Svojstva individualnih zaštitnih plinova

Argon (Ar)

- inertan plin,
- može se koristiti za zavarivanje svih metala,
- moguće je postići visoku čistoću,
- glavna je komponenta većine mješavina,
- laka ionizacija što ima za posljedicu dobru uspostavu električnog luka,
- relativno niska toplinska vodljivost – nizak napon električnog luka, mali unos topline,
- „prstolik“ oblik penetracije u kombinaciji s niskim unosom topline može uzrokovati poroznost i neprovar (Slika 29).

Helij (He)

- inertan plin,
- visoka cijena – primjena za specijalne namjene,
- može se koristiti za zavarivanje svih metala,
- otežana ionizacija – loša uspostava električnog luka,
- znatno viša toplinska vodljivost od argona,
- znatno viši napon električnog luka nego od argona,
- šira i dublja penetracija; manje koncentriran električni luk,
- lakše izbjegavanje poroznosti i toplih pukotina,
- bolje kvašenje površine – manje nadvišenje zavara i manja opasnost od ugorina,
- niže gustoće od argona – mora se koristiti veći protok.



Slika 29. Utjecaj zaštitnog plina na penetraciju zavara kod MIG zavarivanja aluminija [5]

Ugljični dioksid (CO_2)

- aktivan plin (na sobnoj temperaturi stabilan), koristi se za MAG zavarivanje,
- koristi se sam ili u kombinaciji s argonom,
- jeftin i dostupan,
- veći napon električnog luka, veća toplinska vodljivost, širi zavar nego korištenjem argona.

Kisik (O_2)

- koristi se samo kao manjinska komponenta zaštitnog plina,
- može se koristiti kao oksidacijski element za stabilizaciju električnog luka, kao alternativa ugljičnom dioksidu,
- smanjuje površinski napetost kapljica metala u električnom luku i taline – tečnija talina, ljepši oblik zavora, ali otežano zavarivanje u prisilnim položajima.

Dušik (N_2)

- koristi se kao komponenta kod zavarivanja austenitnih i dupleks nehrđajućih čelika, maks. 5 %, za kompenzaciju odgorenog dušika, odnosno kao element za formiranje austenita,
- čisti dušik se može koristiti za zavarivanje bakra,
- za zaštitu korijenskog zavora kod TIG zavarivanja.

Vodik (H_2)

- komponenta plina za zavarivanje austenitnih metala (austenitnih čelika, nikla i legura nikla), maks. 5 %,
- potreban je veći napon za uspostavu električnog luka,
- omogućava korištenje veće brzine zavarivanja,
- reducira okside i daje vrlo čistu površinu,
- visok rizik od poroznosti – koristi se samo za zavarivanje u jednom prolazu.

3.4.2.2 Mješavine zaštitnih plinova za zavarivanje aluminija

Za zavarivanje aluminija se najčešće koristi argon.

Zbog visoke toplinske vodljivosti aluminija, korisno je povećati unos topline zaštitnog plina. Zbog toga se argonu dodaje helij, do 80 %. Preko toga je ometena sposobnost uspostave električnog luka. Helij proširuje električni luk i poboljšava oblik zavora, omogućuje veću

brzinu zavarivanja, smanjuje poroznost.

Vodik se nikako ne smije koristiti jer izrazito jako utječe na poroznost aluminijski. Iz istog razloga se mora ukloniti vlaga, čijoj apsorpciji je sklon aluminijski površinski oksid.

Kod zavarivanja aluminijski se ponekad koristi mala količina, do 0,1 %, plinova za poboljšanje stabilnosti električnog luka. Osim spomenutih oksidacijskih plinova, ugljik dioksida (CO_2) i kisika (O_2), u tu svrhu se koriste i dušik (N_2) te dušikov monoksid (NO). [5]

3.5 Parametri MIG zavarivanja

Proces MIG zavarivanja zavisi o više tehnoloških parametara: [5]

- promjeru žice,
- naponu zavarivanja,
- brzini dodavanja žice i struji zavarivanja,
- brzini zavarivanja,
- induktivitetu (dinamičkim svojstvima struje zavarivanja),
- duljini slobodnog kraja žice,
- zaštitnom plinu i protoku,
- uzorku njihanja pištolja,
- načinu prijenosa metala u električnom luku.

Većinu tih parametara treba međusobno uskladiti za optimalan proces zavarivanja. Iskusnom zavarivaču ne treba mnogo vremena kako bi za određenu situaciju pronašao radnu točku procesa zavarivanja unutar tolerancija, međutim za optimizaciju automatiziranog procesa zavarivanja treba uložiti više truda i vremena.

3.5.1 Promjer žice

Promjer žice se bira prema struji zavarivanja, međutim za određeni promjer postoji puno širi i preklapajući izbor struja zavarivanja nego kod REL postupka. Prijenos metala je uglađeniji kad se koristi žica manjeg promjera.

Kod zavarivanja aluminijski, zbog mekane žice se odabiru veći promjeri.

3.5.2 *Napon zavarivanja*

Napon zavarivanja je direktno proporcionalan duljini električnog luka. Povećanjem napona dobiva se širi zavar, dok preveliki napon uzrokuje ugorine.

Kod zavarivanja kratkim spojevima se primjećuje obrnuto proporcionalni odnos napona zavarivanja i frekvencije kratkih spojeva. Povećanjem napona se smanjuje frekvencija kratkih spojeva uz veće kapljice i više štrcanja materijala. Prevelikim smanjenjem napona se otežava uspostavljanje električnog luka i povećava rizik od udaranja žice u zavar.

Napon zavarivanja je važan parametar kod zavarivanja tankih limova kratkim spojevima jer omogućava zavarivanje velikim brzinama bez pregaranja materijala. Za takav postupak treba izabrati nizak napon ali dovoljno visok da frekvencija kratkih spojeva ne bude preniska i da ne ugrozi stabilnost električnog luka.

Kod dinamički opterećenih kutnih zavara se očekuje nizak profil zavara s blagim prijelazima na rubovima. Takvi zavari se postižu ispravnim odabirom napona zavarivanja. [5]

Kod višeslojnog zavarivanja, ako je visina zavara prevelika može doći do nedovoljnog provara i naljepljivanja slijedećih slojeva. Povećanjem napona se može optimizirati oblik presjeka pojedinih gusjenica zavara. [5]

3.5.3 *Brzina dodavanja žice i struja zavarivanja*

Struja zavarivanja je općenito glavni parametar kod elektrolučnog zavarivanja i bira se prema debljini osnovnog materijala i brzini zavarivanja s obzirom na zahtijevanu kvalitetu zavara.

Kod postupka MIG zavarivanja struja se namješta indirektno, preko brzine dodavanja žice i odabira njenog promjera na izvoru struje za zavarivanje.

3.5.4 *Brzina zavarivanja*

Brzina zavarivanja direktno utječe na produktivnost zavarivanja.

Općenito veća brzina zavarivanja uzrokuje uži zavar. Prevelika brzina smanjuje toleranciju varijacije svih ostalih parametara zavarivanja. [5]

Razvijene su specijalne tehnike koje povećavaju toleranciju na varijacije parametara za korištenje kod visokoproduktivnog zavarivanja.

3.5.5 Induktivitet

Induktivitet električnog kruga izvora za zavarivanje je tehnološki parametar koji utječe na brzinu promjene karakteristike struje za zavarivanje prilikom promjene duljine električnog luka. Utječe na brzinu povećanja i smanjenja struje i ima značajan utjecaj na kvalitetu zavora.

Mali induktivitet omogućava brzu promjenu struje. Uzrokuje koncentriran električni luk, ali povećava štrcanje.

Povećanjem induktiviteta smanjuje se brzina promjene struje. Dobiva se nešto šiti zavar i „mekši“ zvuk prilikom zavarivanja. Preveliki induktivitet uzrokuje nestabilan električni luk uz sklonost udaranja žice u zavar.

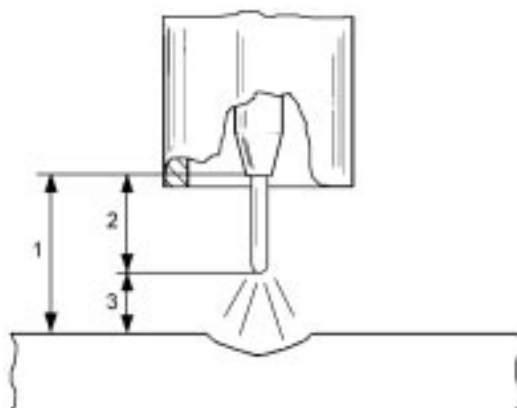
Efekt induktiviteta se u nekoj mjeri može zamijeniti strmijom statičkom karakteristikom izvora.

U inverterskim izvorima struje, dinamička svojstva se upravljaju elektroničkim upravljačkim sklopom.

Induktivitet se namješta na izvoru struje prema promjeru žice za zavarivanje.

Najveći utjecaj induktiviteta na svojstva postupka zavarivanja se primjećuje kod zavarivanja kratkim spojevima.

3.5.6 Duljina slobodnog kraja žice



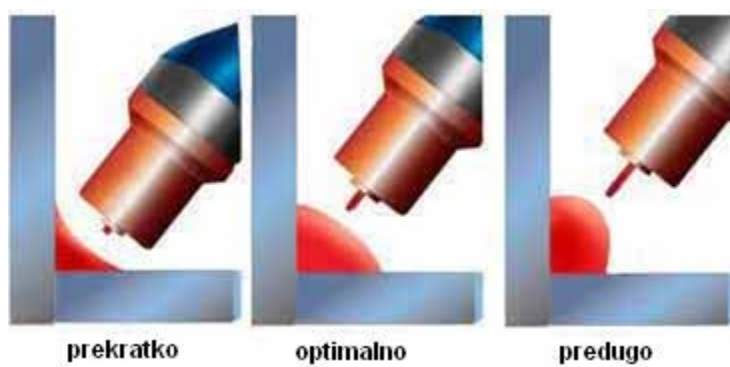
Slika 30. Slobodan kraj žice [5]

Slika 30 prikazuje lako mjerljivu udaljenost vrha kontaktne cijevčice do površine izratka (3) i povezanost te veličine s duljinom slobodnog kraja žice (2). Iskustveno se za tu udaljenost uzima vrijednost promjera žice pomnožena s faktorom 10 – 15. [5]

Ako je slobodni kraj žice prekratak, električni luk će utjecati na navarivanje žice na kontaktnu cjevčicu i sapnicu. To uzrokuje onečišćenje plinske sapnice i vrtloženje zaštitnog plina što dovodi do djelomičnoj izloženosti mjesta zavarivanja okolišnom zraku.

Prekratki slobodni kraj žice povećava mogućnost udaranja žice u zavar, pogotovo prilikom početka zavarivanja.

Duljina slobodnog kraja žice ima utjecaj i na struju zavarivanja i oblik zavora. Ako se poveća, struja zavarivanja i unos topline se smanjuju, dok količina nataljenog materijala ostaje ista. Takva kombinacija smanjuje penetraciju i daje viši profil zavora, (Slika 31). Ako se to ne dešava namjerno, može doći do naljepljivanja.



Slika 31. Utjecaj duljine slobodnog kraja žice na oblik zavora [10]

U pravilu, duljinu slobodnog kraja žice bi trebalo održavati konstantnom tokom zavarivanja. Ako se kontrolirano koristi, može poslužiti za povećanje količine nataljenog metala zavora.

3.5.7 Izbor zaštitnog plina i protoka

Za MIG zavarivanje se koriste inertni plinovi, najčešće razmjerno pristupačan argon (Ar) i njegove mješavine s helijem (He). Helij povišuje vrijednost unosa topline, što je korisno kod zavarivanja dobro vodljivog debelostjenog aluminija i bakra. Zaštitni plinovi su detaljnije elaborirani u poglavlju 3.4.2.

Protok zaštitnog plina ima važan utjecaj na kvalitetu zavora. Kod preniske brzine protoka, zaštita od utjecaja atmosfere nije dovoljna. Kod prevelikog protoka, javlja se turbulentno strujanje, koje „uvlači“ kisik i dušik u električni luk. U oba slučaja se stvaraju oksidi i poroznost.

Izbor brzine protoka zaštitnog plina ovisi o mnogo čimbenika. Neki od njih su [5]:

- gustoća zaštitnog plina,
- veličina plinske sapnice,
- udaljenost sapnice od izratka,
- vrsta metala,
- vrsta spoja i položaj zavarivanja,
- količina metalnih para,
- parametri zavarivanja (štrcajući luk, kratki spojevi,...),
- brzina strujanja okolišnog zraka.

Preporučena brzina protoka za mješavine argona za zavarivanje kratkim spojevima je 10-15 l/min, za zavarivanje štrcajućim lukom 15-25 l/min. Kod korištenja većih plinskih sapnica je potrebno povećati protok zaštitnog plina. Orijentaciona vrijednost brzine protoka argona u l/min je brojčana vrijednost unutarnjeg promjera plinske sapnice u mm, npr. 15 l/min za sapnicu promjera 15 mm.

Helij zahtijeva veći protok zbog manje gustoće.

Za zavarivanje aluminija potreban je veći protok zaštitnog plina nego kod čelika.

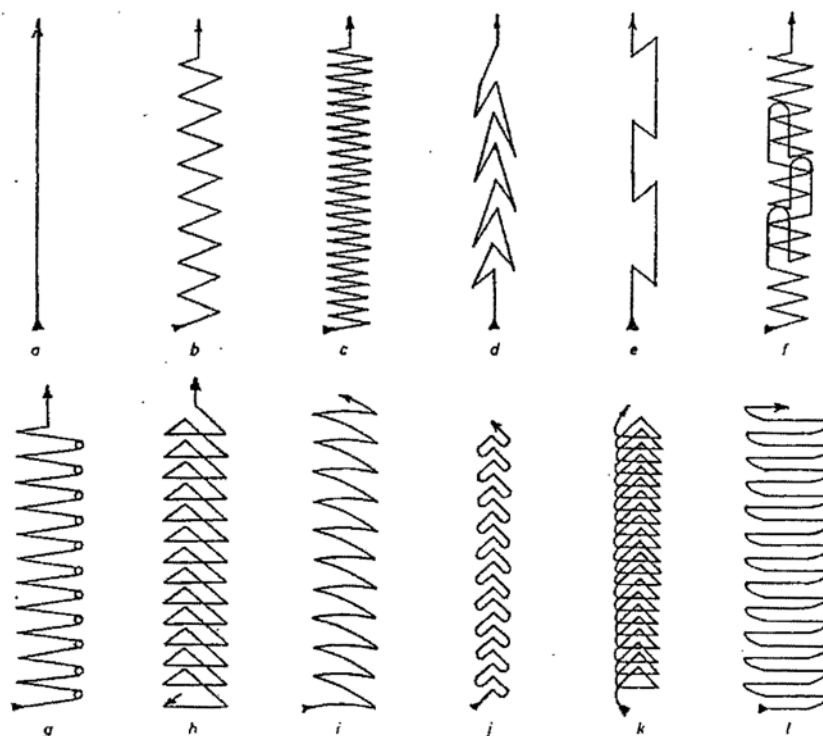
3.5.8 *Uzorak njihanja pištolja*

Njihanje pištolja se ponekad koristi za popunjavanje širokih priprema za zavarivanje ili za proširivanje zadnjeg prolaza višeprolaznog zavara.

Često se koristi u vertikalnom položaju zavarivanja radi bolje kontrole nad talinom.

Gibanje se može vršiti s jedne strane na drugu, ponekad u kombinaciji s gibanjem naprijed-natrag uz mogućnost pauze na svakoj strani. [5]

Kod robotiziranog zavarivanja tehnika njihanja se može koristiti u kombinaciji s elektrolučnim senzorom za vođenje pištolja uzduž pripreme za zavarivanje.



Slika 32. Shematski prikaz raznih načina vođenja pištolja njihanjem [11]

3.5.9 Način prijenosa metala impulsnim zavarivanjem

Impulsno dodavanje žice niskim frekvencijama omogućuje metalu da se djelomično skruti između impulsa. Za vrijeme impulsa visoke struje se osigurava penetracija i popunjavanje zazora uz kontrolirane srednje vrijednosti zavarivačkih parametara koje mogu biti dovoljno niske za zavarivanje u prisilnim položajima i za zavarivanje tankih materijala

Impulsno zavarivanje je detaljnije opisano u poglavlju 3.1.3.

3.6 Tehnike zavarivanja

Na kvalitetu zavarenog spoja, osim optimalnih parametara, važan utjecaj ima i tehnika zavarivanja koja je određena međusobnim položajem pištolja za zavarivanje i izratka.

Kod MIG zavarivanja postoje tri osnovne tehnike:

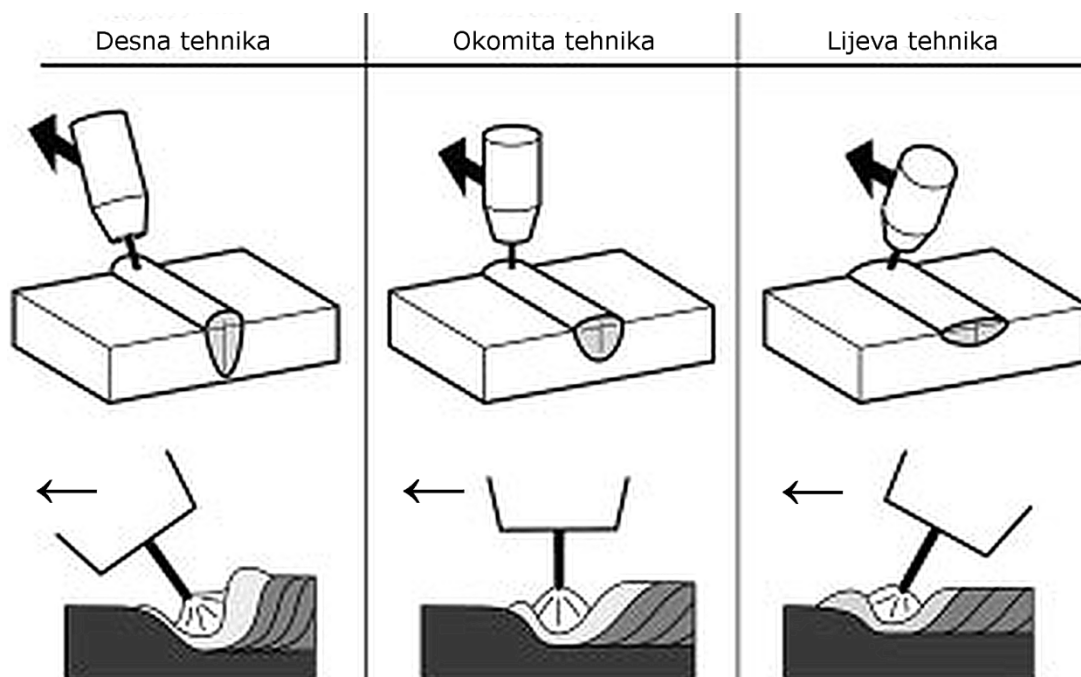
- Desna (engl. „backhand“) tehnika
- Lijeva (engl. „forehand“) tehnika
- Okomita tehnika

Prilikom zavarivanja lijevom tehnikom, pištolj se usmjeruje u suprotnom smjeru od već ostvarenog zvara. Takvom tehnikom se dobiva plići i širi zavar. Moguće je postići veću brzinu zavarivanja. Smanjena je vidljivost zvara.

Koriste se kutovi otklona od $10 - 15^\circ$ od okomitog položaja, kod zavarivanja aluminija $10 - 30^\circ$ radi svojstva čišćenja oksidnog sloja lijeve tehnike.

Zavarivanje desnom tehnikom znači usmjeravanje pištolja za zavarivanje u smjeru prethodno ostvarenog zvara. Penetracija je dublja i zavar je uži.

Moguće ju i zavarivanje postavljanjem pištolja okomito na osnovni materijal u tzv. „neutralni“ položaj. Ovim se načinom dobiva zavar koji je kombinacija karakteristika „lijeve“ i „desne“ tehnike, odnosno dobiva se zavar dublje penetracije nego što se dobio „lijevom“ tehnikom, a ipak širi od zvara dobivenog „desnom“ tehnikom. Postoji opasnost od protaljivanja materijala, pošto je većina sila u luku usmjerena okomito na zavar.



Slika 33. Učinci desne i lijeve tehnike zavarivanja [5]

Prilikom zavarivanja kutnog spoja, važan je i kut pištolja za zavarivanje u ravni okomitoj na smjer zavarivanja. Zavarivanje pod nepravilnim kutom može uzrokovati nedovoljni provar.

Kod zavarivanja debelih ploča vrh žice treba biti usmjeren 1-2 mm od kutnog spoja u smjeru vodoravne ploče. Tim pomakom se kompenzira veća disipacija topline i postiže se simetričan profil zvara. [5]

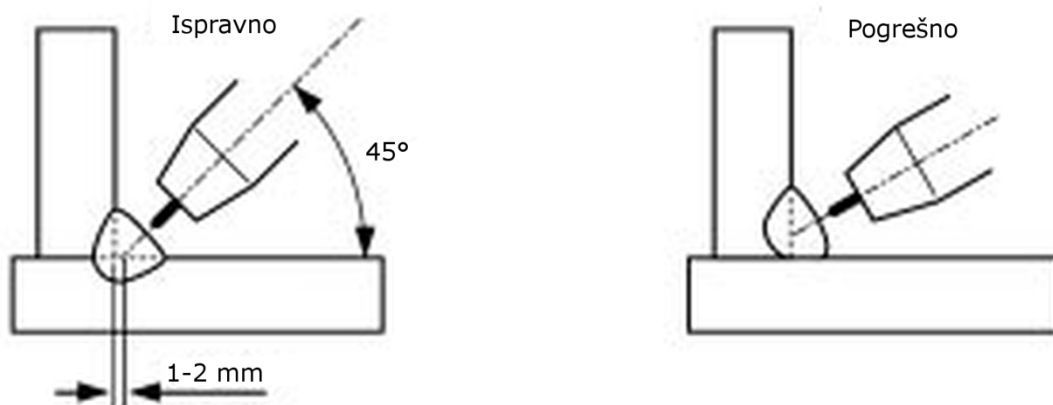
Na oblik zvara utječe i ako ploča koja se zavaruje nije skroz horizontalna, već pod nagibom. Kod zavarivanja prema dolje, nadvišenje zvara je manje, brzina zavarivanja se povećava. Penetracija se smanjuje, a širina zvara povećava. Ti utjecaji se mogu iskoristiti kod

zavarivanja tankih limova.

Prilikom zavarivanja prema gore, talina curi zbog gravitacije i stvara se visok i uzak zavar.

Radi izbjegavanja opasnosti od naljepljivanja, treba izbjegavati talinu previše ispred električnog luka. To se može desiti kada je:

- preveliki unos topline,
- preveliki kut kod zavarivanja lijevom tehnikom,
- zavarivanje prema dolje.



Slika 34. Kut pištolja za zavarivanje kutnih spojeva [5]

4. SVOJSTVA I ZAVARLJIVOST ALUMINIJA I ALUMINIJSKIH LEGURA

4.1 Opća svojstva aluminija

Uz kisik, aluminij je najrasprostranjeniji element u zemljinoj kori s preko 8% udjela. Prvi puta se pojavio 1855.g. na svjetskoj izložbi u Parizu. Danas se jedino čelik koristi više od aluminija. [11]

Dobiva se iz rude boksita, koja se prerađuje u glinicu Al_2O_3 , iz koje se izdvaja elektrolizom, uz veliku potrošnju električne energije (16 kWh/kg aluminija). [11]

Aluminij i aluminijske legure se koriste kao valjani, prešani (ekstrudirani) i lijevani materijali, poluproizvodi i proizvodi. Primjenjuju se u građevinarstvu, prehrambenoj industriji, kriogenoj tehnici, za izradu posuda pod tlakom u vojnoj tehnici i za izradu ambalaže.

Tablica 5 prikazuje fizička svojstva čistog aluminija.

Tablica 5. Svojstva čistog aluminija [11]

Talište	660 °C
Gustoća pri 20 °C	2700 kg/m ³
Koeficijent linearnog istezanja (0-100 °C)	$23,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Specifični toplinski kapacitet (0-100 °C)	920 J/Kg·K
Toplinska vodljivost (0-100 °C)	240 J/m·s
Specifični električni otpor (20 °C)	0,0269 W·mm ² /m
Modul elastičnosti (20 °C)	71900 N/ mm ²

Ostala korisna svojstva aluminijskih materijala su [11]:

- oko 2,9 puta lakši od čelika,
- prekidna čvrstoća od najviše 700 N/ mm², uz dobru istezljivost,
- dobra mehanička svojstva pri niskim temperaturama,
- toplinska vodljivost 13 puta veća od nehrđajućeg čelika, 4 puta veća od običnog čelika,
- električna vodljivost približna bakru ali dvostruko veća u odnosu na masu,
- visoka toplinska i svjetlosna reflektivnost,

- dobra otpornost na koroziju, te dekorativnost površine. Prirodno se zaštićuje slojem oksida, čime se postiže samozaštita u normalnoj atmosferi. Anodizacijom i lakiranjem („eloksiranjem“) se može postići odličan dekorativni efekt.
- nije magnetiča,
- posebno pogodan za proizvodnju prešanjem (ekstrudiranjem) složenih punih i šupljih presjeka.

4.2 Svojstva vezana za zavarljivost

Al₂O₃ prirodan sloj oksida na hladnom materijalu je debljine oko 0,01 mm. Ima visoku kemijsku otpornost. Visoka temperatura taljenja aluminijskog oksida od oko 2050 °C, u kombinaciji s niskim talištem aluminijskog oksida od 660 °C predstavlja problem za zavarivanje. Al₂O₃ je bezbojan i vrlo tvrd. U prirodi se pojavljuje obojen zbog prisutnosti drugih metala i u malim količinama kao rubin, safir, korund ili glinica. Troska od Al₂O₃ ima gustoću od 3200 kg/m³ te ulazi u talinu. [11]

Pri visokim temperaturama toplinske obrade ili zavarivanja krutog ili rastaljenog aluminijskog oksida, na površini se stvara deblji sloj oksida, kao i na kapima metala. Zbog toga se ne može dobiti homogeni zavareni spoj bez uključaka oksida, ako se oni ne odstranjuju neposredno prije i/ili tokom procesa zavarivanja. Kožica oksida se uključuje u zavareni spoj kao nemetalni uključak. [11]

Za razaranje i odstranjivanje oksida koristi se električni luk u inertnoj atmosferi, uz elektrodu na + polu, prašci za zavarivanje pri plinskom zavarivanju i lemljenju, kemijsko nagrivanje osnovnog i dodatnog materijala ili mehaničko odstranjivanje. [11]

Dobra toplinska vodljivost stvara potrebu za snažnim i koncentriranim izvorima energije za zavarivanje i visoki unos topline unatoč niskoj temperaturi tališta. Pri zavarivanju slabim i nedovoljno koncentriranim izvorima energije, nastaje široka ZUT s omekšanom strukturom. Zbog visoke toplinske vodljivosti čistog aluminijskog oksida, postoji velika opasnost od pojave poroznosti. Zbog toga je kod zavarivanja većih debljina potrebno predgrijavanje.

Dobra električna vodljivost predstavlja teškoće za elektrootporno zavarivanje, odnosno zahtjeva jake struje i kratko vrijeme zavarivanja.

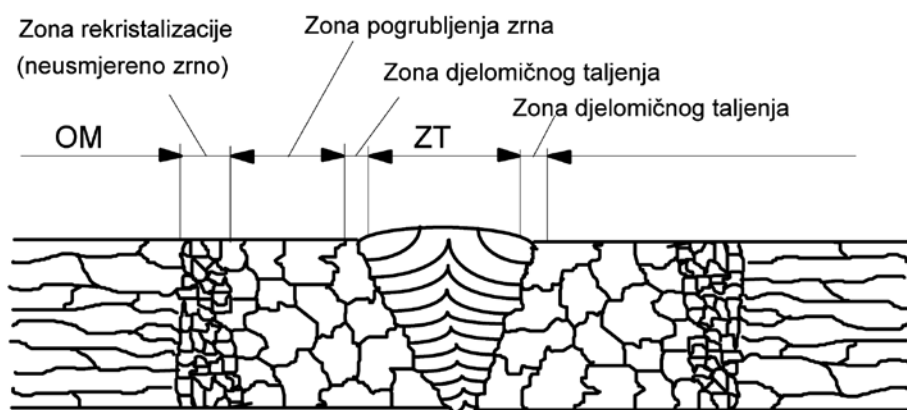
Veliki koeficijent toplinskog istezanja uzrokuje veća stezanja i deformacije pri hlađenju i posljedično mogućnost pojava pukotina.

Visoka rastvorljivost vodika u talini. Tokom kristalizacije naglo pada rastvorljivost vodika. Zbog toga se stvaraju mjehurići vodika koji mogu uzrokovati poroznost.

Nema promjene boje tokom zagrijavanja kao kod čelika. Zbog toga zavarivač ne može procijeniti temperaturu pri zagrijavanju do tališta, što može stvarati poteškoće kod zavarivanja i lemljenja.

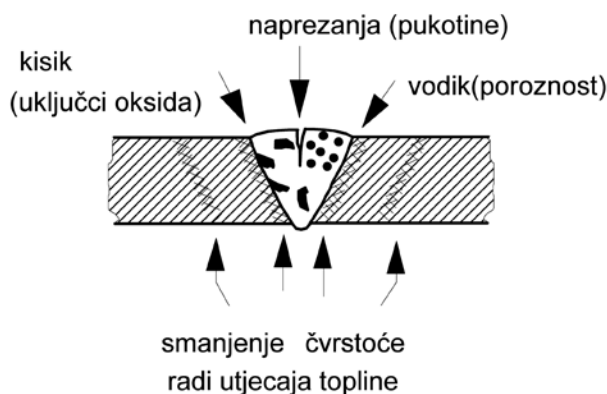
Skлонost vrućim i u manjoj mjeri hladnim pukotinama ovisi o kemijskom sastavu i uvjetima zavarivanja.

Omekšanje na mjestu zavarenog spoja. Konstrukcijski aluminijski materijali se obično isporučuju u očvrnutom stanju. Zavarivanjem se na mjestu spoja javlja ljevačka struktura materijala, čija čvrstoća je najmanja, kao u meko žarenom stanju. Zbog toga se u avioindustriji još uvijek vrlo često koriste zakovični spojevi. Orijentacijski koeficijent oslabljenja zavarenog spoja je 0.6. [11]



Slika 35. Zone zvara na aluminijskom materijalu [11]

Slika 35 prikazuje zone zavarenog spoja na hladno deformiranom aluminijskom materijalu, odnosno čistom aluminiju ili leguri.



Slika 36. Najčešće greške zavarenog spoja na aluminijskim materijalima [11]

Slika 36 prikazuje najčešće vrste grešaka koje mogu nastati prilikom zavarivanja aluminijskih materijala.

4.3 Legirni elementi

Glavni legirni elementi aluminijskih legura su bakar, silicij, mangan, magnezij, litij i cink.

Za poboljšanje određenih svojstava se mogu u maloj količini dodati nikal, krom, titan, cirkonij i skandij.

Ostali elementi koji su prisutni u aluminijskim legurama se smatraju nečistoćama i nastoji ih se ukloniti.

Učinci legirnih elemenata u legurama aluminija su:

- Magnezij (Mg) povećava čvrstoću mehanizmom očvršćivanja pomoću čvrste topivosti (engl. *solid solution strengthening*) i poboljšava očvršćivanje deformacijom (engl. *work hardening*).
- Mangan (Mn) povećava čvrstoću mehanizmom očvršćivanja pomoću čvrste topivosti i poboljšava očvršćivanje deformacijom.
- Bakar (Cu) značajno povećava čvrstoću, omogućuje precipitacijsko očvršćivanje, smanjuje otpornost na koroziju, žilavost i zavarljivost.
- Silicij (Si) povećava čvrstoću i žilavost, u kombinaciji s magnezijem omogućava precipitacijsko očvršćivanje.
- Cink (Zn) značajno povećava čvrstoću, dozvoljava precipitacijsko očvršćivanje, može uzrokovati napetosnu koroziju.
- Željezo (Fe) povećava čvrstoću čistog aluminija, uglavnom je zaostali element.
- Krom (Cr) povećava otpornost na napetosnu koroziju.
- Nikal (Ni) poboljšava čvrstoću na povišenim temperaturama.
- Titan (Ti) se koristi na smanjenje veličine zrna, pogotovo u dodatnom materijalu.
- Cirkonij (Zr) se koristi na smanjenje veličine zrna, pogotovo u dodatnom materijalu.
- Litij (Li) značajno povećava čvrstoću i istezljivost, omogućava precipitacijsko očvršćivanje i smanjuje gustoću legure.
- Skandij (Sc) značajno povećava čvrstoću mehanizmom starenja materijala, koristi se za smanjenje veličina zrna, pogotovo kod zavarivanja.
- Olovo (Pb) i bizmut (Bi) poboljšavaju svojstva kod obrade odvajanjem čestica.

4.4 Metoda označavanja aluminijskih materijala

Postoji više načina za označavanje aluminijskih legura i njihovog stanja.

Prema toj metodi postoje dva načina za označavanje aluminijskih legura, brojčana i prema oznakama kemijskih elemenata. Metoda je detaljno opisana u normi HRN EN 573.

Prema navedenoj metodi koriste se slijedeći prefiksi:

- AB – ingoti,
- AC – lijevani materijal,
- AM – predlegura za lijevanje (engl. *cast master alloy*),
- AW – gnječeni materijal (engl. *wrought product*).

Za gnječene legure prva znamenka se koristi za označavanje glavnog legirnog elementa:

- AW 1XXX – tehnički čisti aluminij,
- AW 2XXX – aluminijske legure s bakrom,
- AW 3XXX – aluminijske legure s manganom,
- AW 4XXX – aluminijske legure s silicijem,
- AW 5XXX – aluminijske legure s magnezijem,
- AW 6XXX – aluminijske legure s magnezijem i silicijem,
- AW 7XXX – aluminijske legure s cinkom i magnezijem,
- AW 8XXX – dodatak ostalih elemenata, npr. litija i željeza,
- AW 9XXX – nije određena legirna grupa.

Osim za tehnički čisti aluminij, zadnje tri znamenke se koriste za oznaku određene legure na proizvoljan način.

Kod označavanja tehnički čistog aluminija zadnje dvije znamenke se koriste za oznaku minimalnog udjela aluminija, npr. AW-1098 sadrži najmanje 99,98 % aluminija, AW-1090 sadrži najmanje 99,90 % aluminija. Druga znamenka označava dozvoljeni udio određenih nečistoća.

Postoji 36 normiranih ljevačkih aluminijskih legura, od čega su 29 na bazi silicija kao legirnog elementa.

Ljevačke legure se dijele na 11 podskupina:

- AC 2 1XXX – Al Cu,
- AC 4 1XXX – Al SiMgTi,

- AC 4 2XXX – Al Si7Mg,
- AC 4 3XXX – Al Si10Mg,
- AC 4 4XXX – Al Si,
- AC 4 5XXX – Al Si5Cu,
- AC 4 6XXX – Al Si9Cu,
- AC 4 7XXX – Al Si(Cu),
- AC 4 8XXX – Al SiCuNiMg,
- AC 5 1XXX – Al Mg,
- AC 7 1XXX – Al ZnMg.

4.4.1 Oznake stanja aluminijskih materijala

Mehanička svojstva aluminijskih legura ne ovise samo o njihovom kemijskom sastavu, već i stanju u kojem se nalaze.

Stanje se označava sufiksom, jednim od pet slovnih oznaka stanja kojima može biti pridružen broj za preciznije određivanje stanja.

Osnovne oznake stanja su:

- F – Primarno stanje: hladno ili toplo oblikovano ili lijevano pri čemu nije primijenjena posebna kontrola toplinskog procesa ili procesa deformiranja.
- O – Oporavljeno (potpuno žareno): Primjenjuje se za gnječene poluproizvode koji se žare radi smanjenja čvrstoće ili za odljevke koji se žare da bi se povećala duktilnost i dimenzijska stabilnost.
- H - Hladno deformirano: Odnosi se na toplinski neočvrstive gnječene legure koje su očvrstnute postupkom hladnog deformiranja sa ili bez dodatne toplinske obrade kojom se naknadno može smanjiti čvrstoća.

Prva brojka iza slova H označava osnovno stanje:

- H1 – samo hladno deformirano,
- H2 – hladno deformirano i djelomično odžareno. Kada se legura očvrstne više nego je potrebno, žari se na niskoj temperaturi kako bi se omekšala na zahtijevanu tvrdoću i čvrstoću.

- H3 – hladno deformirano i stabilizirano. Stabilizacija je niskotemperaturna toplinska obrada provedena tokom ili nakon proizvodnje kojim se povećava žilavost i smanjuje omekšavanje tokom vremena.
- H4 – hladno deformirano i pobjano.
- W – Rastvorno žareno: Označava nestabilno stanje koje se koristi za rastvorno žarene legure koje spontano očvršćuju pri sobnoj temperaturi tijekom perioda od više mjeseci ili čak godina.
- T – Toplinski obrađeno: Koristi se za legure čija čvrstoća se stabilizira unutar nekoliko tjedana nakon rastvornog žarenja sa ili bez precipitacijskog očvršćivanja. Primjenjuje se za legure tipa 2xxx, 6xxx i 7xxx. Iza slova T slijedi jedan ili više brojeva koji označuju redoslijed provedenih postupaka:
 - T1 – hlađeno s povišene temperature preoblikovanja i prirodno dozrijevano,
 - T2 – hlađeno s povišene temperature preoblikovanja, hladno oblikovano (deformirano) i prirodno dozrijevano,
 - T3 – rastvorno žareno (homogenizirano), hladno oblikovano i prirodno dozrijevano,
 - T4 – rastvorno žareno i prirodno dozrijevano,
 - T5 – hlađeno s povišene temperature preoblikovanja i umjetno dozrijevano,
 - T6 – rastvorno žareno i umjetno dozrijevano,
 - T7 – rastvorno žareno i nadozrijevano ili stabilizirano,
 - T8 – rastvorno žareno, hladno oblikovano i umjetno dozrijevano,
 - T9 – rastvorno žareno, umjetno dozrijevano i hladno oblikovano.

Oznake stanja toplinski obrađenih legura su cjelovito opisane u normi HRN EN 515.

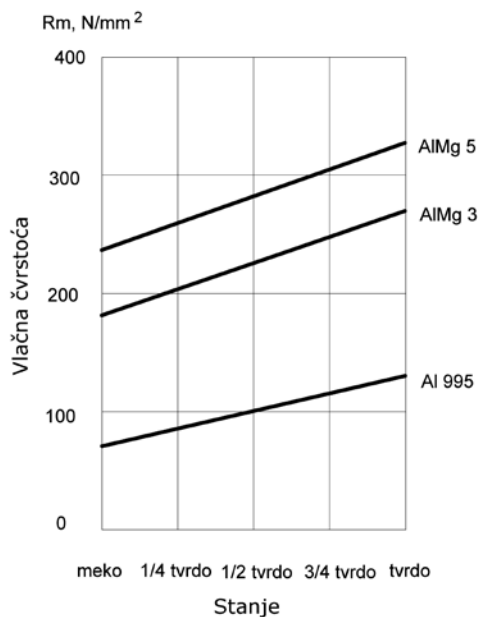
4.5 Vrste aluminijskih materijala

Čisti aluminij ima čvrstoću od 90 do 190 N/mm², ovisno o stanju isporuke. Prema stupnju hladne deformacije isporučuje se kao tvrdi, ½ tvrdi i ¼ tvrdi.

Čvrstoća aluminijskih materijala se može povišiti na sljedeće načine: [11]

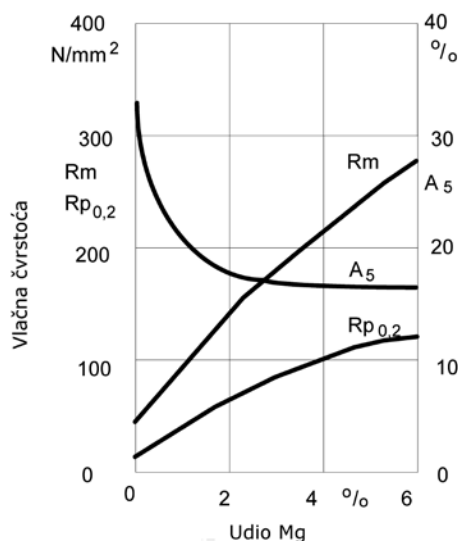
- hladnom deformacijom,
- legiranjem,
- toplinskom obradom,

- kombinacijom, npr. legiranjem i hladnom deformacijom.



Slika 37. Povećanje čvrstoće aluminijских materijala hladnom deformacijom [11]

Slika 37 prikazuje ovisnost čvrstoće aluminijских materijala o stupnju hladne deformacije.



Slika 38. Povećanje čvrstoće aluminija legiranjem [11]

Slika 38 prikazuje utjecaj legiranja na mehanička svojstva aluminijского materijala.

Aluminijские legure se dijele na dvije grupe:

- toplinski neobradive legure, tj. aluminijские legure bez strukturnog očvršćivanja:
AlMn, AlMgMn, AlMg,

- toplinski obradive legure, tj. legure sa strukturnim očvršćivanjem: AlCuMg, AlMgSi, AlZnMg, AlLiCuZr, AlLiCuMgZr.

Pošto se u inženjerskoj praksi najviše koriste valjani i prešani (ekstrudirani) proizvodi od aluminija, ovdje će biti posebno razmotrene upravo te skupine aluminijskih materijala, često zvane gnječnim legurama (engl. *wrought aluminium and aluminium alloys*). Zbog dobre istezljivosti je aluminij vrlo pogodan za plastično oblikovanje.

4.5.1 Toplinski neobradive legure aluminija

Kod ovih materijala očvršćivanje se postiže dodavanjem legiranih elemenata (Mg, Si, Mn, Fe i drugih), hladnom plastičnom deformacijom i žarenjem. Tako se može postići širok raspon mehaničkih svojstava, od mekog stanja s minimalnim mehaničkim karakteristikama i maksimalnom plastičnošću do tvrdih stanja s maksimalnom čvrstoćom i granicom razvlačenja, uz minimalnu plastičnost.

Prema HRN EN 573-3 [12] u ovu grupu spadaju skupine 1XXX (aluminij), 3XXX (legure s manganom) i 5XXX (legure s magnezijem).

Nelegirani aluminij (1XXX) se razlikuje po čistoći, odnosno udjelu nečistoća Fe, Si u aluminiju. Odlikuje ga izvanredna otpornost prema atmosferskim uvjetima, odlična toplinska i električna vodljivost i odlična plastičnost, odnosno sposobnost oblikovanja. Čvrstoća mu je mala. Primjena mu je vrlo raširena, koristi se u elektro industriji, kemijskoj industriji, petrokemiji, građevinarstvu, za dekorativne svrhe. Zavarljivost mu je odlična.

Legure s manganom (3XXX). U ovoj skupini je mangan osnovni legirajući element. Najčešći predstavnik je legura 3003 (AlMn), koja ima izvrsnu plastičnost, otpornost na atmosferske uvjete i dobro je zavarljiva. Koristi se za duboko vučenje, za izmjenjivače topline i slične proizvode. Legura 3004 (AlMgMn) se koristi za proizvodnju konzervi za piće i cijevi iz traka zavarivanjem.

Legure s magnezijem (5XXX). Legirajući element je magnezij, u nekim slučajevima se dodaje mangan i krom. Mehanička svojstva materijala iz ove skupine su osrednja, ali se dobro zavaruju i imaju znatno poboljšana mehanička svojstva pri niskim temperaturama. Ako je sadržaj magnezija veći, odlično se ponašaju u morskoj atmosferi. Oblikovljivost je dobra, ali opada s porastom sadržaja magnezija. Primjena je raznovrsna; građevinarstvo, brodogradnja, uređaji za desalinizaciju morske vode, posude, cisterne za transport.

4.5.2 Toplinski obradive legure aluminija

Sadrže bakar (Cu), silicij (Si), magnezij (Mg), litij (Li) i cink (Zn). Odlikuje ih mogućnost strukturnog očvršćivanja.

Očvršćivanje se postiže toplinskim postupkom. Prva etapa je žarenje, s ciljem otapanja bar jednog legirajućeg elementa u čvrstoj otopini aluminija na temperaturama 450 – 550 °C. Slijedi gašenje, tj. naglo hlađenje, najčešće uranjanjem u hladnu vodu. Time se zadržava pri sobnoj temperaturi struktura koju je aluminijski materijal imao u zagrijanom stanju u kojem su legirni elementi „zarobljeni“ u prezasićenoj čvrstoj otopini precipitata. Naglo hlađen metal je u nestabilnom stanju i teži stabilnijem stanju pri sobnoj temperaturi, tj. postupno dozrijeva. Ta pojava je popraćena značajnim porastom čvrstoće i naziva se **strukturno očvršćivanje**. Treća etapa toplinske obrade se može odvijati na sobnoj temperaturi. Tada se radi o prirodnom dozrijevanju. Mogu se koristiti i nešto povišene temperature, tada se radi o umjetnom dozrijevanju. [11] [13]

Ovu grupu predstavljaju tri skupine: legure s bakrom (2XXX), legure sa silicijem i magnezijem (6XXX) i legure s cinkom i magnezijem (7XXX).

Legure s bakrom (2XXX). Bakar je glavni legirni element. Mehanička svojstva materijala iz ove skupine dostižu vrijednosti mekih čelika. Komercijalni naziv za ove legure je „dural“. Upotrebljavaju se za nosive dijelove. Posjeduju loša antikorozivna svojstva i u pravilu se loše zavaruju. Često se oblažu s čistim aluminijem kao antikorozivnom zaštitom. Često se koriste u avioindustriji, naoružanju i mehaničkim dijelovima kao što su zakovice i vijci.

Legure sa silicijem i magnezijem (6XXX). Legirajući elementi su silicij i magnezij koji tvore precipitat Mg_2Si . Mehaničke vrijednosti ovih materijala su osrednje. Izvanredno dobro se oblikuju. Antikorozivna svojstva i zavarljivost im je dobra. Legure iz ove skupine se mogu podijeliti da dva dijela:

- a) Bogatije silicijem i magnezijem, uz dodatak mangana, kroma, cirkonija. Imaju bolja mehanička svojstva i koriste se za nosive elemente.
- b) Siromašnije silicijem i magnezijem, što im omogućuje velike brzine prešanja i odličnu oblikovljivost uz nešto lošija mehanička svojstva. Primjena im je raznovrsna: dekoracija, prozori, vrata, fasade, zavareni dijelovi, cijevi, transportna oprema, karoserije, dijelovi vagona vlakova.

Legure s cinkom i magnezijem (7XXX). Cink i magnezij su glavni predstavnici. Ako je dodan bakar, može se postići najveća čvrstoća među svim aluminijskim legurama. Komercijalni naziv im je „konstruktal“. Dijelev se na dva dijela:

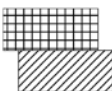
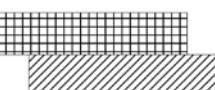
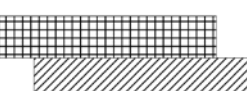
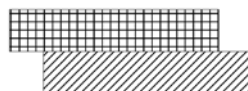
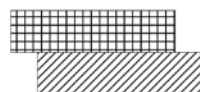
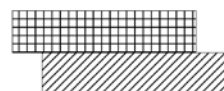
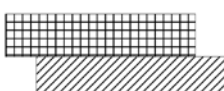
- a) Legure s bakrom imaju najveću čvrstoću. Zavaruju se samo u posebnim uvjetima. Antikorozivna svojstva su im loša. Koristi se u avioindustriji, svemirskoj tehnici i naoružanju-
- b) Legure bez bakra imaju nešto lošija mehanička svojstva. U pravilu su otpornije na koroziju. Upotrebljavaju se u naoružanju, za nosive elemente i sl.


Ostale legure (8XXX). Ovom serijom se označavaju aluminijske legure koje ne spadaju u ostale grupe, npr. 8001 (Al-Ni-Fe) i 8020 (Al-Sn).

Međutim, ova serija opisuje i relativno nove aluminij-litij (Al-Li) legure. Litij je najlakši metal i njegovim dodatkom se smanjuje masa aluminijske legure 3 % za svakih 1 % dodanog litija, sve do 15 % ukupne uštede. Uz to, takve legure imaju visok modul elastičnosti, koji može biti viši od nekih ostalih očvrstivih aluminijskih legura. Zbog tih svojstava su Al-Li legure pogodne za korištenje u zrakoplovnoj industriji, gdje mogu zamijeniti visokočvrste ali teže i nezavarljive legure serije 2XXX. Uz litij, leguri se dodaju male količine bakra i magnezija. Ti spojevi međusobnim vezivanjem tvore precipitate i čine Al-Li legure potpuno precipitacijski očvrstivim. Litij ima visok afinitet prema kisiku, zato treba vrlo pažljivo zagrijavati ove legure. Sloj oksida treba temeljito odstraniti strojnom obradom 0.2 mm površine neposredno pred zavarivanje, inače postoji opasnost od poroznosti. Uz to može biti potrebno štititi korijen zavara inertnim plinom zbog prevencije poroznosti i oksidacije.

Tablica 6 prikazuje grupe aluminijских legura. Vidljivo je kako se legiranjem mogu značajno poboljšati mehanička svojstva.

Tablica 6. Mehanička svojstva nekih aluminijских materijala [11]

Legura	Serija	Tip	Internacionale oznake	Raspon mehaničkih karakteristika (MPa)						
				0	100	200	300	400	500	600 700
Toplinski neobradive legure	1000	Al	1050A 1070A 1100 1200 1080							
	3000	Al-Mn	3003 3004 3005 3105							
	5000	Al-Mg	5086 5083 5056A 5456 5052 5005 5454 5754 5254 5182							
Toplinski obradive legure	2000	Al-Cu Al-Cu-Mg	2011 2030 2017A 2618A 2024 (2124) 2014 (2214) 2219							
	6000	Al-Si-Mg	6005A 6060 6061 6082 6081 6106 6351							
		Al-Zn-Mg	7020 7021 7039							
	7000	Al-Zn-Mg-Cu	7049A 7175 7075 7475 7010 7150 7050							

Granica razvlačenja, Rp ----- 

Prekidna čvrstoća, Rm ----- 

5. ROBOTI ZA MIG ZAVARIVANJE

5.1 Osnovna građa industrijskih robota

Robot je službeno definiran prema HRN EN ISO 8373:1994 kao *upravljani, reprogramirajući, višenamjenski manipulator programabilan u tri ili više osi, koji može biti ili stacionaran ili mobilan za primjene u industrijskoj automatizaciji*.

Navedena definicija opisuje *industrijske robote*, odnosno robote sadašnjice. Za robote budućnosti se postavljaju puno složeniji zahtjevi.

Roboti se mogu podijeliti u tri generacije [14]:

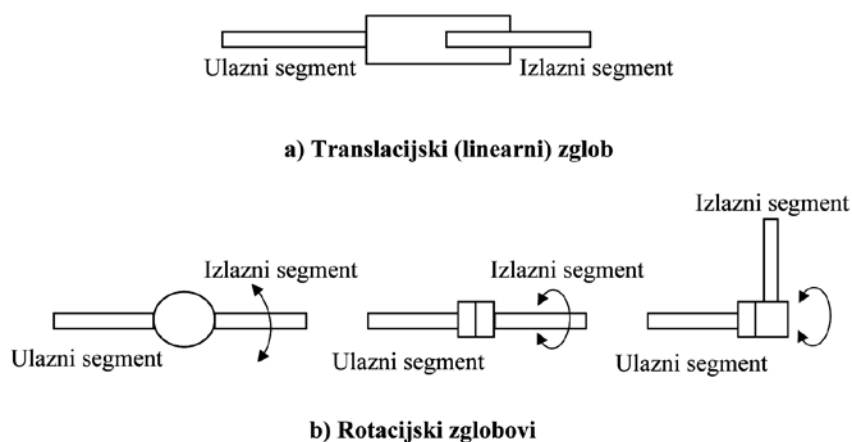
- Prva generacija robota se naziva programirani roboti. Njih karakterizira čisto upravljanje. To je upravljački lanac; upravljački uređaj – prigon – mehanizam ruke – prihvatnica, pa nema povratne informacije. Ti su roboti bez osjetila i s vrlo ograničenom "inteligencijom". Zapravo, od atributa inteligencije imaju samo pamćenje (memoriju), u koju je pohranjen program. Uz ograničenu inteligenciju i osjete, znatno zaostaju u spretnosti i pokretljivosti u odnosu prema čovjekovoj ruci. Ipak, djelotvorno mogu obavljati niskokvalificirani rad uz visokoorganiziranu okolinu.
- Druga generacija robota (senzitivni roboti) opremljena je nizom senzora (vizualni, taktilni, senzor sile), a mogu imati i sustave za raspoznavanje. Roboti preko senzora dobivaju informacije o stanju okoline, a pomoću jednostavne logike, ugrađene u računalo, takvi roboti imaju mogućnost reagiranja na utjecaje okoline. U tim je slučajevima već riječ o regulaciji s petljom povratne veze uz pamćenje, ti roboti imaju mogućnost donošenja jednostavne logičke odluke: da ili ne. Na taj se način kontrolom sile mogu zaštititi uređaji, smanjiti organiziranost okoline (slaganje, orijentacija predmeta).
- Treća generacija robota (inteligentni roboti) opremljena je, osim sustavima za raspoznavanje i računalima nove generacije pomoću kojih je moguće vršiti vođenje multivarijabilnog procesa s više izlaznih i ulaznih varijabli. Cijeli sustav bi trebao imati svojstva višeg stupnja inteligencije, tj. donošenja odluke u determiniranim uvjetima (analiza), učenje i odlučivanje u nedeterminiranim uvjetima (sinteza). Za tu je umjetnu inteligenciju najbitnija mogućnost učenja (povezuje nova iskustva s postojećim znanjem). To se može postići modelom okoline ugrađenim u memoriju računala, odnosno datotekom. Uspoređivanjem s dobivenim informacijama iz okoline,

robot samostalno reagira na vanjske promjene, tj. donosi odluke bez programske upute.

Osnovne komponente industrijskog robota su [14]:

- Mehanička struktura ili manipulator koji se sastoji od niza krutih segmenata (eng. links) povezanih pomoću zglobova (eng. joints). Ponašanje manipulatora je određeno rukom (eng. arm) koja osigurava pokretljivost, ručnim zglobom (eng. wrist) koji daje okretljivost i vrhom manipulatora (eng. end effector) koji izvršava operacije zahtijevane od robota
- Aktuatori (pogoni) postavljaju manipulator u određeno kretanje pomicanjem zglobova. Najčešće se upotrebljavaju električni i hidraulički motori, a ponekad i pneumatski. Senzori detektiraju status manipulatora (proprioceptivni senzori) i, ako je potrebno, status okoline (heteroceptivni senzori).
- Sustav upravljanja (računalo) omogućuje upravljanje i nadzor kretanja manipulatora.

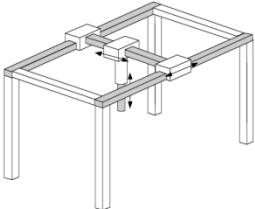
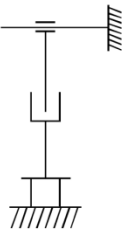
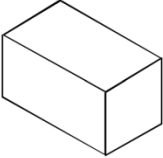
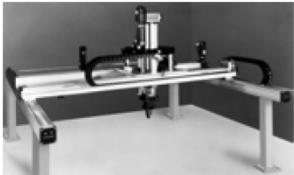
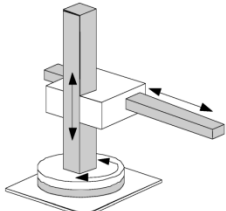
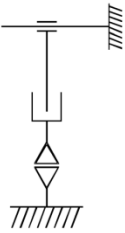
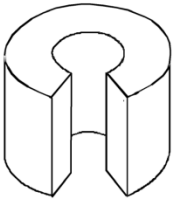
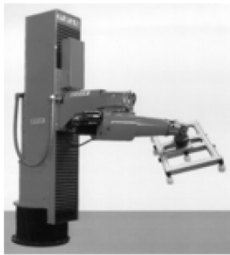
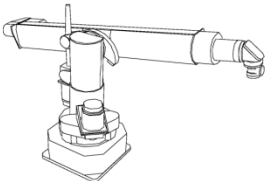
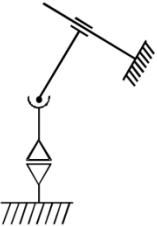
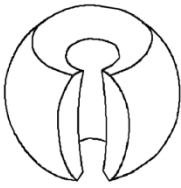

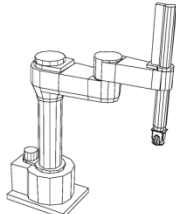
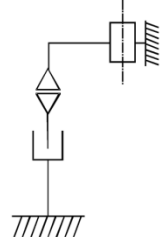
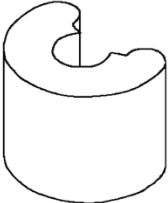

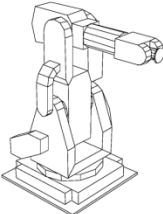
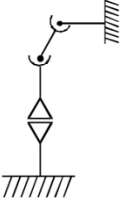


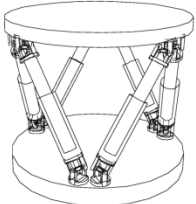
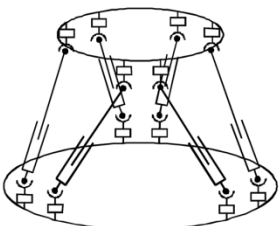
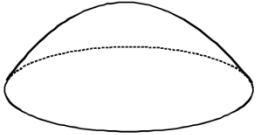

Kod industrijskog se robota koriste dva tipa zglobova: rotacijski (eng. revolute joint) i translacijski (eng. prismatic joint). Rotacijski zglob vrši rotaciju oko osi, a translacijski linijsko kretanje duž osi. Dva susjedna zgloba spojena su pomoću krutih segmenata. Na ručni zglob pričvršćena je šaka (eng. hand) koja se još naziva vrh manipulatora ili alat.



Slika 39. Osnovni tipovi zglobova industrijskog robota [15]

Osnovne karakteristike robota definira konfiguracija osi koja određuje njegovo gibanje u prostoru i stupnjeve slobode gibanja. Radni prostor je trodimenzionalan i kako bi se vrh manipulatora mogao dovesti u bilo koju točku unutar radnog prostora, potrebo je šest stupnjeva slobode. Zbog toga je većina robota građena upravo sa šest stupnjeva slobode gibanja.

Uobičajena konstrukcija robota koristi prve tri osi za određivanje pozicije ručnog zgloba, a ostale tri određuju položaj vrha alata. Konfiguracija zglobova robotskog manipulatora se naziva kinematička struktura robota.

ROBOT	OSI		PRIMJER
NAČELO RADA	KINEMATIČKA STRUKTURA	RADNI PROSTOR	FOTOGRAFIJA
 PRAVOKUTNI (<i>cartesian</i>)	 TTT		
 CILINDRIČNI	 RTT		
 SFERIČNI	 RRT		
 SCARA	 RRT		
 ROTACIJSKI (<i>articulated</i>)	 RRR		
 PARALELNI			

Slika 40. Najčešće konfiguracije industrijskih robota

Slika 40 prikazuje najčešće korištene varijacije četiri osnovne kinematičke strukture industrijskih robota [14]:

- pravokutna (*engl. cartesian*) : TTT,
- cilindrična (*engl. cylindrical*): RTT,
- sferična (*engl. spherical*): RRT,
- rotacijska (*engl. articulated*): RRR.

Pravokutnu konfiguraciju robota čine tri translacijska zglobova s međusobno okomitim osima, koje odgovaraju osima u kartezijском koordinatnom sustavu. Takva struktura ima dobru mehaničku čvrstoću. Točnost pozicioniranja je visoka i konstantna u cijelom radnom prostoru. Pokretljivost strukture je slaba. Radni prostor je oblika prizme. Motori su električni, rijetko pneumatski. Koristi se za montažu i rukovanje materijalom.

Cilindrična konfiguracija se dobije ako se prvi zglob kod pravokutne strukture zamijeni rotacijskim. Radni prostor se nalazi između dva koncentrična plašta valjka. Mehanička čvrstoća je dobra, ali točnost pozicioniranja ručnog zgloba ovisi o horizontalnoj poziciji zgloba. Koristi se za prenošenje predmeta većih dimenzija. Koristi hidraulične motore češće nego električne.

Sferična konfiguracija nastaje zamjenom drugog zgloba cilindrične konfiguracije rotacijskim. Radni prostor je ograničen dvjema koncentričnim sferama. Mehanička čvrstoća je manja od prethodno spomenutih konfiguracija zbog složenije konstrukcije. Točnost pozicioniranja se smanjuje povećanjem radijalnog položaja. Koristi se uglavnom u strojarskoj industriji. Najčešće se koriste električni motori za pokretanje zglobova.

SCARA (*engl. selective compliance assembly robot arm*) robot također koristi dva rotacijska i jedan translacijski zglob. Sve tri osi su okomite. Robot posjeduje visoku mehaničku čvrstoću u vertikalnoj osi, slabu u horizontalnoj. Koristi se za montažu u vertikalnoj osi. Točnost pozicioniranja ovisi o udaljenosti između ručnog zgloba i osi prvog zgloba.

Rotacijska konfiguracija, koja se još naziva zglobna ili antropomorfna konfiguracija, dobiva se korištenjem sva tri rotacijska zglobova. Osi rotacije drugog i trećeg zgloba su paralelne i okomite na os rotacije prvog zgloba. Ako ne bi postojala ograničenja rotacijskog gibanja, radni prostor bi bio kugla. Uz ograničenja, radni prostor je dio kugle kompleksnog oblika, najčešće u obliku polumjeseca. Koriste se elektromotori za pogon zglobova. Područje primjene je široko.

Paralelna konfiguracija koristi tri ili više linearne osi koje djeluju paralelno. Ovdje pojam „paralelno“ znači istovremeno i preuzet je iz informatičke terminologije a ne geometrijskog opisa. Svaka linearna os se sastoji od dva rotacijska i jednog translacijskog zgloba. Ručni zglob se nalazi na kraju povezanih linearnih osi. Paralelna konfiguracija posjeduje veću preciznost i čvrstoću te veću brzinu od serijskih konfiguracija. Nedostatak je što zauzimaju više prostora u odnosu na radni prostor od serijskih konfiguracija. Koriste se za montažu elektroničkih štampanih pločica, brzim i visokopreciznim glodalicama, simulatorima zrakoplova i automobila, itd.

Navedene kinematičke strukture manipulatora određuju poziciju ručnog zgloba u prostoru. Za pozicioniranje vrha alata u trodimenzionalnom prostoru, ručni zglob mora imati svoja tri stupnja slobode, koja se ostvaruju rotacijskim zglobovima.

5.2 Robotska oprema za MIG zavarivanje

Robot je ključni dio proizvodnih stanica za MIG zavarivanje. One su zamijenile automate za velikoserijsko zavarivanje zbog velike fleksibilnosti. Robot je vrlo efektivan u vođenju pištolja za zavarivanje.

Robotizirano zavarivanje je danas razvijena i zrela tehnologija, ali pošto je manje od 10 % zavara izvedenih robotom u ukupnoj količini zavara, postoji veliki potencijal za uvođenje robotiziranog zavarivanja u proizvodnju.

Osobine robota za MIG zavarivanje moraju zadovoljavati [5]:

- pokretljivost korištenjem bar pet osi,
- veliki radni prostor,
- visoka i preciznost i ponovljivost pozicioniranja,
- visoka točnost brzine zavarivanja,
- velika brzina prijelaza među zavarima,
- dobra kontrola ubrzavanja i usporavanja,
- mogućnost računalnog programiranja uz specifične funkcije za MIG zavarivanje.

Proizvodni i ekonomski zahtjevi određuju različit stupanj integracije robotskog sustava za zavarivanje.

Kompletni sustav za robotizirano elektrolučno zavarivanje se sastoji od [5]:

- robota za elektrolučno zavarivanje, robota za rukovanje materijalom, itd.,
- pozicionera izradaka,
- steznih naprava,
- opreme za zavarivanje (izvor struje, sustav za dodavanje žice, pištolj za zavarivanje),
- alatnog servisnog centra (čistač pištolja, rezač žice, sustav za kalibraciju alata),
- senzora za traženje početka zavara:
 - mehanički taktilni senzor,
 - električni taktilni senzor,
 - optički senzor.
- senzora za praćenje zavara:
 - elektrolučni senzor,
 - laserski senzor.
- sigurnosne opreme (svjetlosne ograde, prekidači, uređaji za resetiranje),
- programska oprema (za „offline“ programiranje i simulaciju, simulaciju procesa MIG/MAG zavarivanja, itd.).

5.2.1 Pozicioneri

Pozicioneri se mogu koristiti i za ručno zavarivanje, a za robotizirano zavarivanje su nužnost jer se njihovom upotrebom povećava proizvodnost i sigurnost sustava.

Pozicioneri izradaka omogućuju:

- povećanje dostupnosti spojeva za zavarivanje,
- zavarivanje u horizontalnom položaju, što je važno za zavare velikih dimenzija,
- povećanje brzine zavarivanja tanjih izradaka djelomičnim nagibanjem u smjeru vertikalnog položaja,
- upotrebu načela dva radna mjesta; robot zavaruje na jednoj strani pozicionera dok operater pozicionira izradak na drugoj strani,
- štiti operatera od utjecaja električnog luka i štrcanja metala,
- smanjena reorijentacija robota – smanjenje proizvodnog ciklusa i smanjeno opterećenje kablenskog paketa pištolja za zavarivanje,

- poboljšava ergonomiju operateru.

Postoji širok spektar različitih izvedbi pozicionera.

Najčešće konfiguracije su:

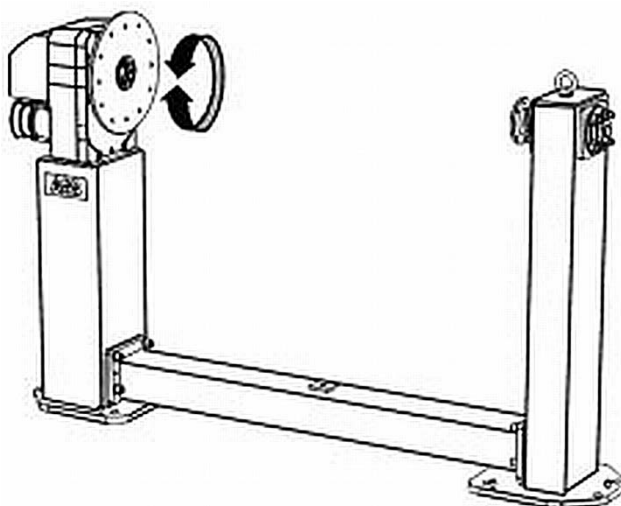
- fiksni stol,
- jednoosni pozicioner, (Slika 41),
- dvoosni pozicioner, (Slika 42),
- stol s izmjenom radnog mjesta, (Slika 43),
- jednoosni pozicioner s vertikalnom izmjenom radnog mjesta, (Slika 44),
- jednoosni pozicioner s horizontalnom izmjenom radnog mjesta, (Slika 45),
- dvoosni pozicioner s izmjenom radnog mjesta, (Slika 46).

Standardni kapacitet pozicionera je 100 kg do 5 t. Postoje specijalne izvedbe kapaciteta preko 50 t.

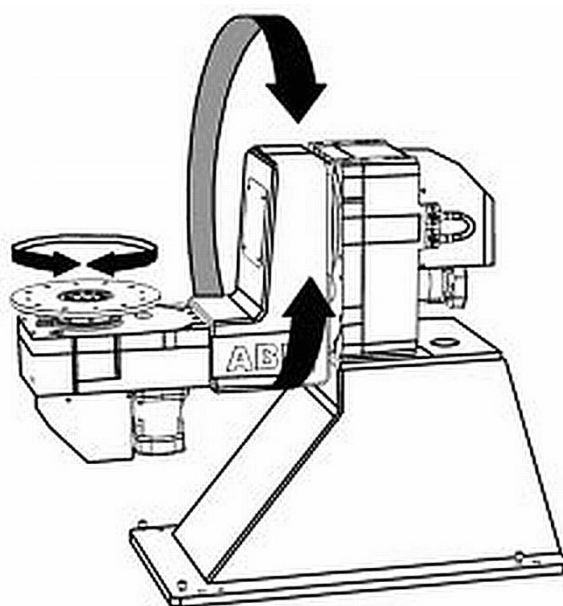
Većina pozicionera za korištenje s robotima je upravljana robotskim sustavom, iako postoje i pozicioneri upravljani vanjskim pogonima. Mali stolovi s promjenom radnog mjesta su ponekad ručno upravljani.

Uobičajena nomenklatura osi robotskog sustava je:

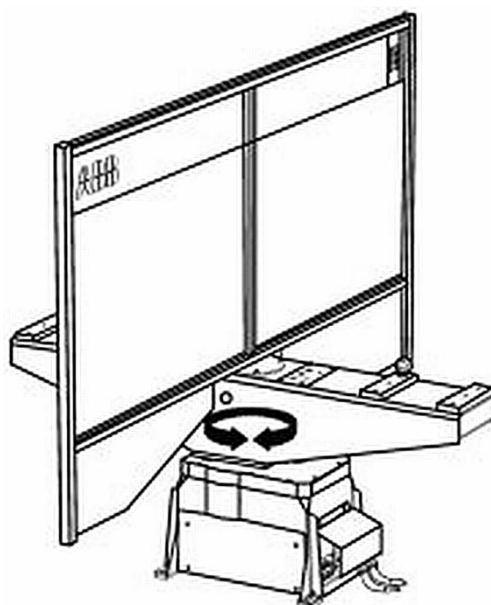
- osi robota su *unutrašnje (interne) osi*,
- osi pozicionera su *dodatne osi*.



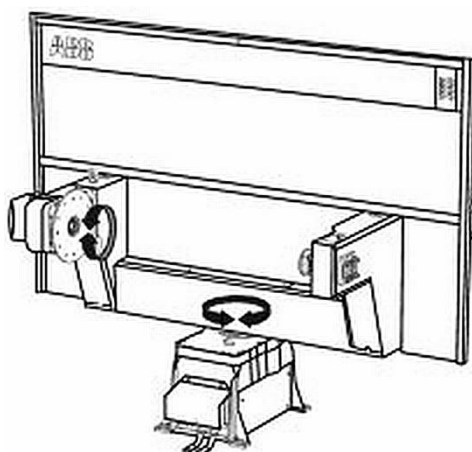
Slika 41. Jednoosni pozicioner [5]



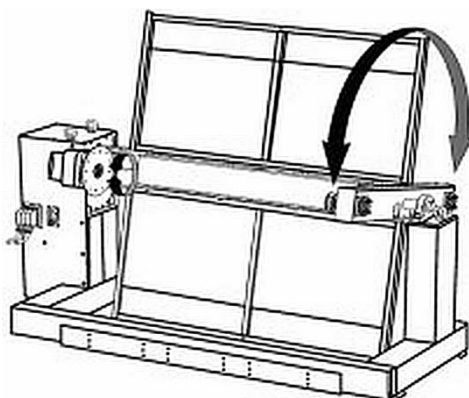
Slika 42. Dvoosni pozicioner [5]



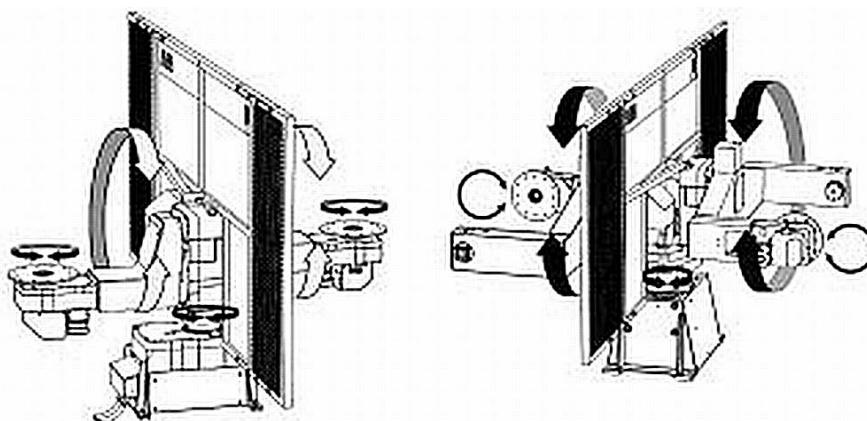
Slika 43. Stol s izmjenom radnog mjesta [5]



Slika 44. Jednoosni pozicioner s vertikalnom izmjenom radnog mjesta [5]



Slika 45. Jednoosni pozicioner s horizontalnom izmjenom radnog mjesta [5]



Slika 46. Dvoosni pozicioner s izmjenom radnog mjesta [5]

5.2.2 Oprema za zavarivanje

Pod opremom za zavarivanje se podrazumijeva izvor struje za zavarivanje, sustav za dodavanje žice i pištolj za zavarivanje, te prateći dijelovi.

Oprema za zavarivanje je kritičan i najosjetljiviji dio sustava za robotizirano zavarivanje. Pokazalo se da je ona dio sustava koji najčešće remeti proizvodni proces po pitanju kvalitete i proizvodnih zastoja. [5]

Zbog tih razloga je vrlo bitno odabrati pouzdanu zavarivačku opremu visokih performansi kako bi se omogućilo potpuno iskorištenje robotske stanice.

Cijena opreme za zavarivanje je oko 10 % cijene robotske stanice, dok pozitivan ili negativan učinak na povrat uložених sredstava može biti preko 50 %. [5]

Osnovni zahtjevi za korištenje MIG/MAG opreme za zavarivanje robotom su:

- prikladnost za korištenje robotom i pouzdanost,
- dovoljna intermitenca, napon i struja zavarivanja za predviđenu namjenu,
- mogućnost jednostavnog programiranja zajedno s robotom,
- jednostavnost održavanja,
- malo zauzeće prostora,
- stupanj integracije u robotski sustav.

5.2.2.1 Stupanj integracije opreme za zavarivanje u robotski sustav

Izvor za zavarivanje je moguće povezati s robotskim sustavom pomoću jedne od tri razine integracije:

- diskretnom U/I analognom ili digitalnom komunikacijom,
- komunikacijskom sabirnicom (CAN bus, DeviceNet, itd.) koristeći predefinirane radne zadatke (engl. *jobs*),
- potpuno integriranom komunikacijskom sabirnicom za sve parametre zavarivanja.

Diskretnom U/I komunikacijom se koriste analogni i digitalni signali za povezivanje tiristorskih ili nesinergijskih inverterskih izvora struje u robotski sustav.

Programirati se mogu slijedeći parametri:

- uključivanje i isključivanje struje,
- uključivanje i isključivanje dobave žice za zavarivanje,
- promjena brzine dodavanja žice korištenjem analognih referentnih veličina,

- promjena napona električnog luka korištenjem analognih referentnih veličina,
- ostali parametri (brzina zavarivanja, itd.) se upravljaju odvojeno robotskim sustavom.

Komunikacijskom sabirnicom (CAN bus, DeviceNet, itd.) koristeći predefinirane radne zadatke se upravljaju sinergijski inverterski izvori struje. Sve informacije se prenose jednim komunikacijskim kabelom između upravljačke jedinice robotske stanice i izvora struje.

Ovakav način integracije omogućuje programiranje slijedećih parametara:

- uključivanje i isključivanje struje,
- uključivanje i isključivanje dobave žice za zavarivanje,
- promjenu brzine dodavanja žice,
- promjenu napona električnog luka,
- pozivanje predefiniranih radnih zadataka programiranih na posebnom upravljačkom panelu izvora struje ili posebnoj upravljačkoj jedinici spojenoj na izvor struje,
- promjenu pojedinih parametara (npr. prosječni napon električnog luka i brzina dodavanja žice) unutar predefiniranog radnog zadatka,
- očitavanje stvarnih procesnih parametara (izmjereni napon, struja, brzina dodavanja žice, itd.)
- ostali parametri (brzina zavarivanja, prosječni napon, premoštenje određene brzine dodavanja žice, itd.) su upravljani odvojeno robotskim sustavom.

Potpuno integriranom komunikacijskom sabirnicom za sve parametre zavarivanja se upravljaju napredni sinergijski izvori struje za zavarivanje. Sve informacije se prenose preko jednog kabla između upravljačkog sustava robotske stanice i izvora struje za zavarivanje.

Svi parametri zavarivanja kojima može upravljati izvor struje za zavarivanje su dostupni i potpuno programirajući iz centralnog sustava za programiranje robotske stanice.

5.2.3 *Senzori za elektrolučno zavarivanje*

Senzori su vrlo zanimljiv dio robotskog sustava jer su ključni za ostvarivanje povratne veze regulacijske petlje. Oni omogućuju robotu da „vidi“ svijet oko sebe i važan su element robota koji samostalno donosi odluke. Stoga se robotski senzori istražuju i unapređuju od samog početka razvoja robotskih sustava.

Danas se u industrijskoj praksi, za elektrolučno zavarivanje, senzori koriste za traženje početka zavara i praćenje pripreme za zavarivanje.

To je korisno kada postoje razlike u toleranciji pripreme izradaka, njihovom netočnom pozicioniranju ili promjeni geometrije pripreme za zavarivanje uslijed toplinskih dilatacija.

Osim u industrijskim postrojenjima, senzori se kod elektrolučnog zavarivanja koriste za mjerenje tehnoloških parametara, kontrolu i kontinuirano praćenje kvalitete zavara, itd.

Kod industrijskih robotskih sustava za elektrolučno zavarivanje najčešće se koriste senzori za traženje zavara i senzori za geometrijske parametre, odnosno praćenje zavara.

5.2.3.1 *Senzori za traženje zavara*

Trenutno su u proizvodnoj industriji najčešće zastupljeni taktilni senzori i blizinski senzori za traženje zavara, odnosno za detekciju žlijeba za zavarivanje.

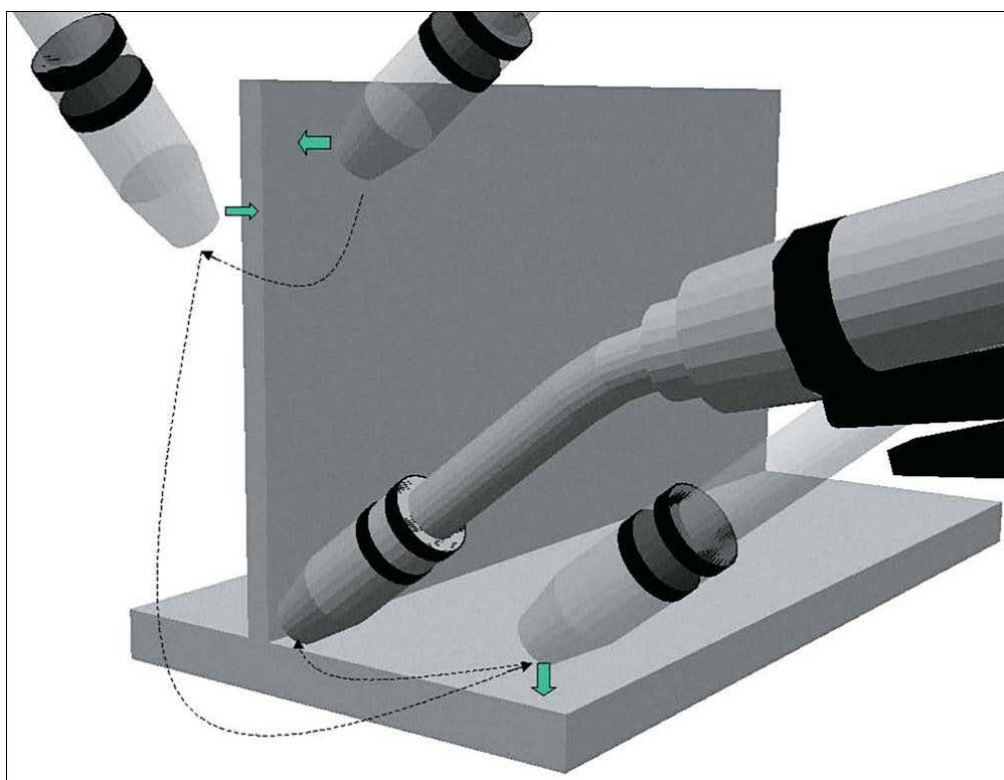
5.2.3.1.1 Taktilni senzori

Taktilni senzori su široko zastupljeno rješenje. Osnova im je apliciranje napona na sapnicu pištolja za zavarivanje, žicu ili nezavisno ticalo. Točna izvedba je kod svakog proizvođača opreme za zavarivanje različita u nekim detaljima. Upravljačke jedinice većine modernih robotskih sustava za zavarivanje imaju ovu mogućnost ugrađenu [16].

Narinut napon može biti od 42 V istosmjerne struje, pa sve do gornjih dozvoljenih granica u regiji u kojoj se sustav koristi. Veći naponi omogućuju veću pouzdanost na loše očišćenim površinama. Kod mjerenja i praćenja kvalitete se koriste niži naponi, već od 7 V.

Načelo rada taktilnih senzora je detekcija kratkog spoja kad senzor pod naponom dotakne komponentu izratka. Kratki spoj prepoznaje upravljačka jedinica robota ili izvor struje za zavarivanje i ta se informacija dalje programski obrađuje.

Obično traženje jedne točke taktilnim senzorom traje oko 2-4 sekunde.



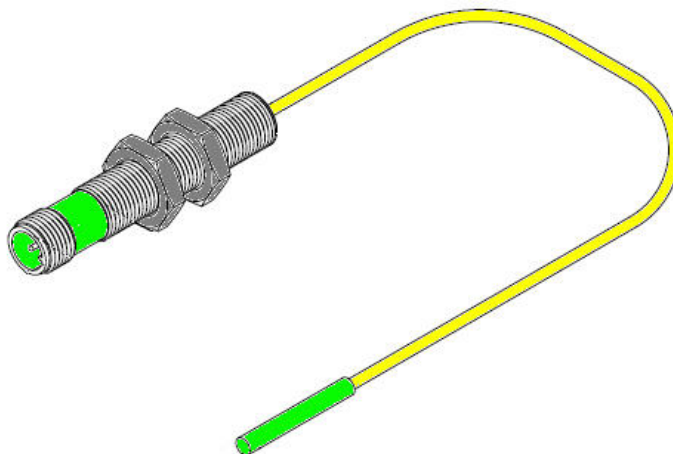
Slika 47. Naponski taktilni senzor [16]

5.2.3.1.2 Senzori udaljenosti

Jednostavni senzori udaljenosti (engl. *proximity sensor*) postoje već dulje vrijeme, međutim tek nedavno su postali puno pouzdaniji i boljih performansi [16].

Osnovni pristup korištenja je sličan kao kod taktilnog senzora. Međutim, blizinski senzor je beskontaktni i radi na principu analognog induktivnog polja. Prednost njegovog korištenja može iskoristiti programer robota tako da pomoću dobro osmišljenog puta zavarivanja skрати vrijeme senzorskih očitavanja i iskoristi pouzdanije podatke.

Blizinski senzor se pričvršćuje kraj pištolja za zavarivanje. Njegovim korištenjem se može dobiti i potpunija informacija o pripremi za zavarivanje, koja se može koristiti na razne načine.



Slika 48. Blizinski senzor (proximity sensor) za detekciju žlijeba za zavarivanje [16]

5.2.3.2 *Senzori za geometrijske parametre*

Senzori za geometrijske parametre se uglavnom koriste za omogućavanje praćenja zavora robota i/ili sposobnost traženja. Tako omogućuju prilagodbu s obzirom na geometrijska odstupanja od nominalne putanje zavarivanja.

Njihova zadaća je prikupljanje informacija o zavaru povezanih s geometrijom zavarenog spoja. Te informacije su od ključnog značaja za praćenje zavora i za kontrolu kvalitete zavora. Postoji mnogo načina za dobivanje tih podataka, najčešće ih prikuplja sustav za praćenje šava zavora. Podaci obično obuhvaćaju odstupanje od nominalne putanje, promjene orijentacije i veličinu zazora.

Općenito, korištenje senzora za robotsko zavarivanje podrazumijeva njihovo korištenje tokom samog procesa zavarivanja. U nekim slučajevima, sensorima se može mjeriti pozicija i orijentacija pripreme za zavarivanje ili izratka prije zavarivanja. U tim slučajevima se mogu koristiti uobičajeni robotski senzori, ne samo zavarivački, kao što se koriste kod prepoznavanja slike ili binarni senzori za detekciju pozicije ploča izratka.

Korištenje senzora tokom procesa zavarivanja je zahtjevan zadatak. Uvjeti su ekstremni; visoka temperatura, svjetlost visokog intenziteta i jake struje zahtijevaju korištenje namjenski izrađenih senzora.

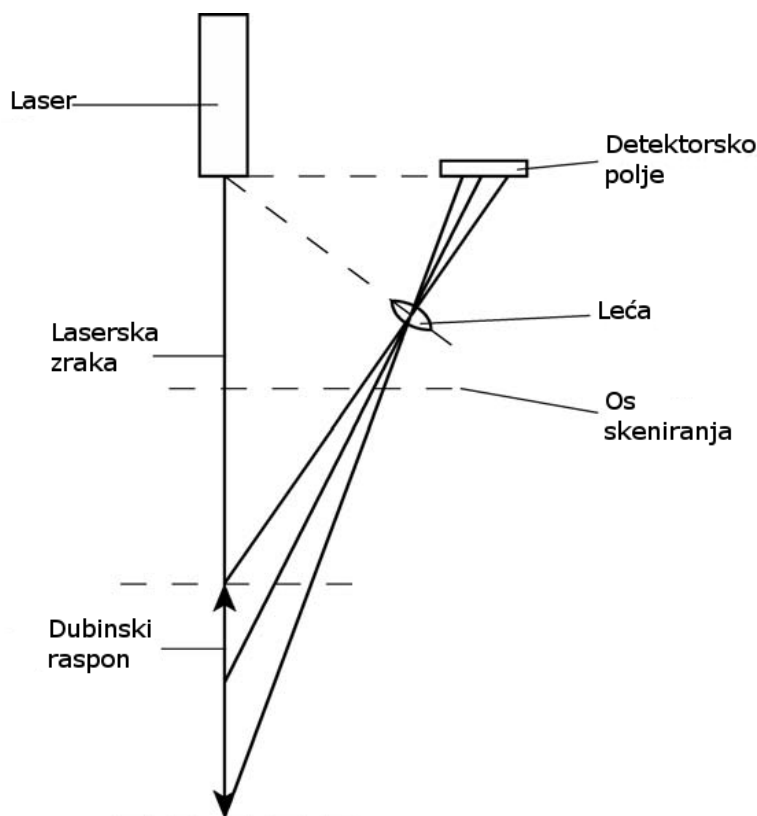
Najčešće se korišteni tipovi senzora za geometrijske parametre su optički senzori i elektrolučni senzori.

5.2.3.2.1 Optički senzori

Detekcija zavarenog spoja pomoću optičkih senzora se vrši po sljedećem načelu:

1. skenirajuća laserska zraka se projicira na šav zavora,
2. CCD senzor u kombinaciji s spektrom projiciranih laserskih zraka mjeri značajke zavarenog spoja

Koriste se razne varijacije ove osnovne tehnike, npr. laserski spektar na zavaru može biti kružni, kako bi se bolje mjerili rubovi zavarenog spoja iz jedne perspektive senzora. Za mjerenje udaljenosti se koristi metoda triangulacije.

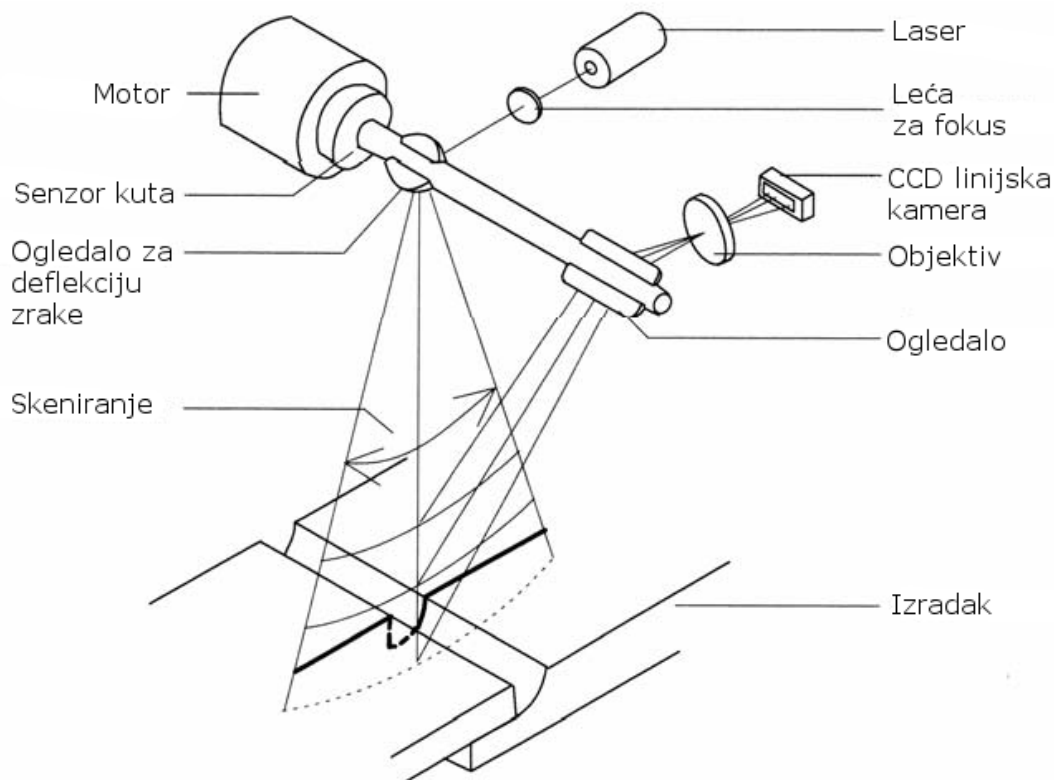


Slika 49. Princip rada metode triangulacije [6]

Laserska zraka se fokusira na predmet pomoću reflektirane zrake, koja prolazi kroz leću senzora i mjeri se udaljenost između senzora i predmeta. Ako je predmet blizu senzora, kut između ulazne i reflektirane zrake je velik, odnosno ako je predmet daleko, kut se smanjuje. Detekcija udaljenosti se vrši pomoću mjerenja fokusirane reflektirane zrake na detektor, koji je u većini slučajeva polje CCD senzora.

Zavisno od pripreme i geometrije spoja, on može reflektirati zraku poput ogledala. Na primjer na V-pripremi se laserska svjetlost može odbijati u više refleksijskih položaja, s različitim intenzitetima. Zbog toga ovi senzori moraju imati sposobnost obrađivanja slike u realnom vremenu zbog filtriranja nepoželjnih refleksija. Pa ipak, visokoreflektivni materijali mogu

uzrokovati probleme kod zavarivanja te se zbog toga na njima prvo moraju izvesti testovi funkcionalnosti.



Slika 50. Princip skeniranja zavora s metodom triangulacije [6]

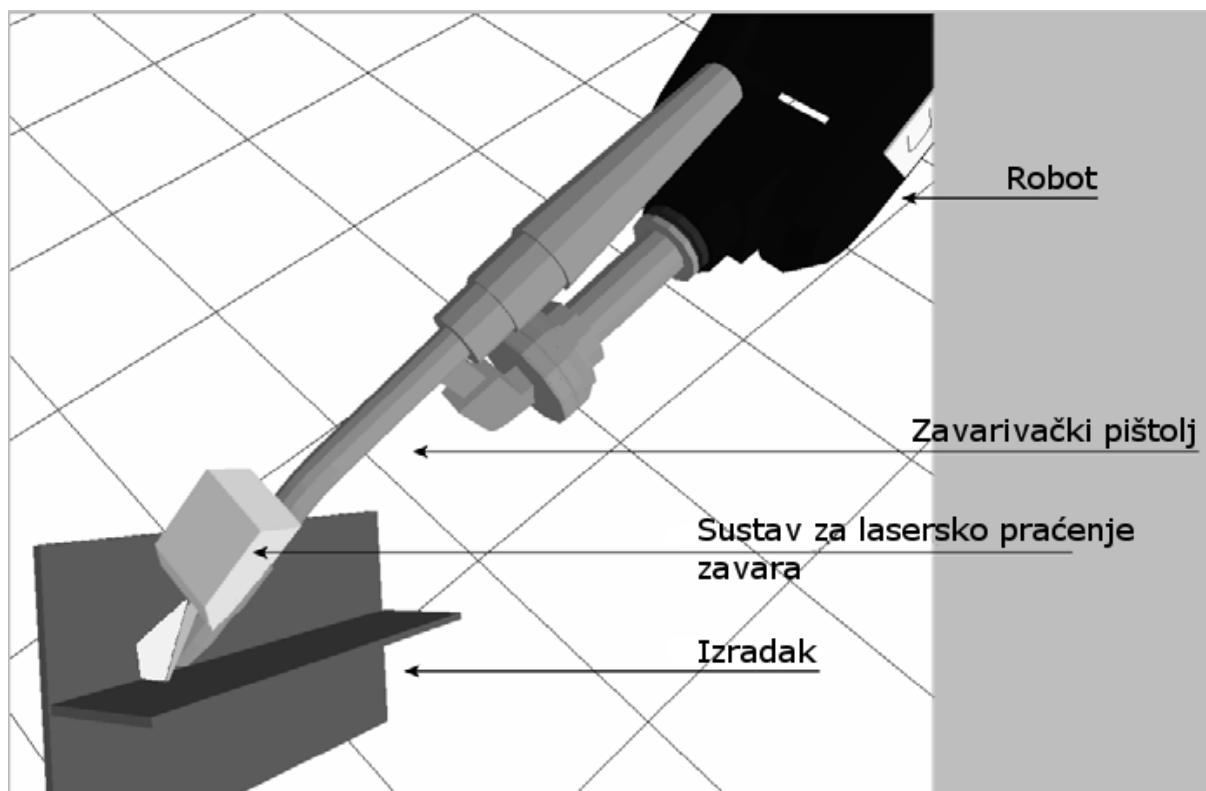
Osnovna funkcija triangulacijskog senzora je mjerenje udaljenosti do točke u koju je usmjerena zraka. To može biti korisno za kontrolu visine između pištolja i izratka tokom robotiziranog zavarivanja.

No općenito, triangulacija se kod zavarivanja koristi za praćenje zavora, što zahtijeva mjerenje geometrije zavarenog spoja. To se ostvaruje tehnikom skeniranja zrakom uzduž zavarenog spoja. Tokom procesa skeniranja, senzor određuje 2D sliku profila spoja. Kada se robot kreće, može se dobiti geometrijski 3D model spoja za zavarivanje.

Ako se ne koristi linijski već 2D CCD senzor, tada se slikovni podaci mogu direktno dobiti, bez micanja robota. Ta tehnika se koristi, uz korištenje kružne zrake, za mjerenje kutova i površina koje ih zatvaraju iz jedne pozicije robota, uz uštedu vremena.

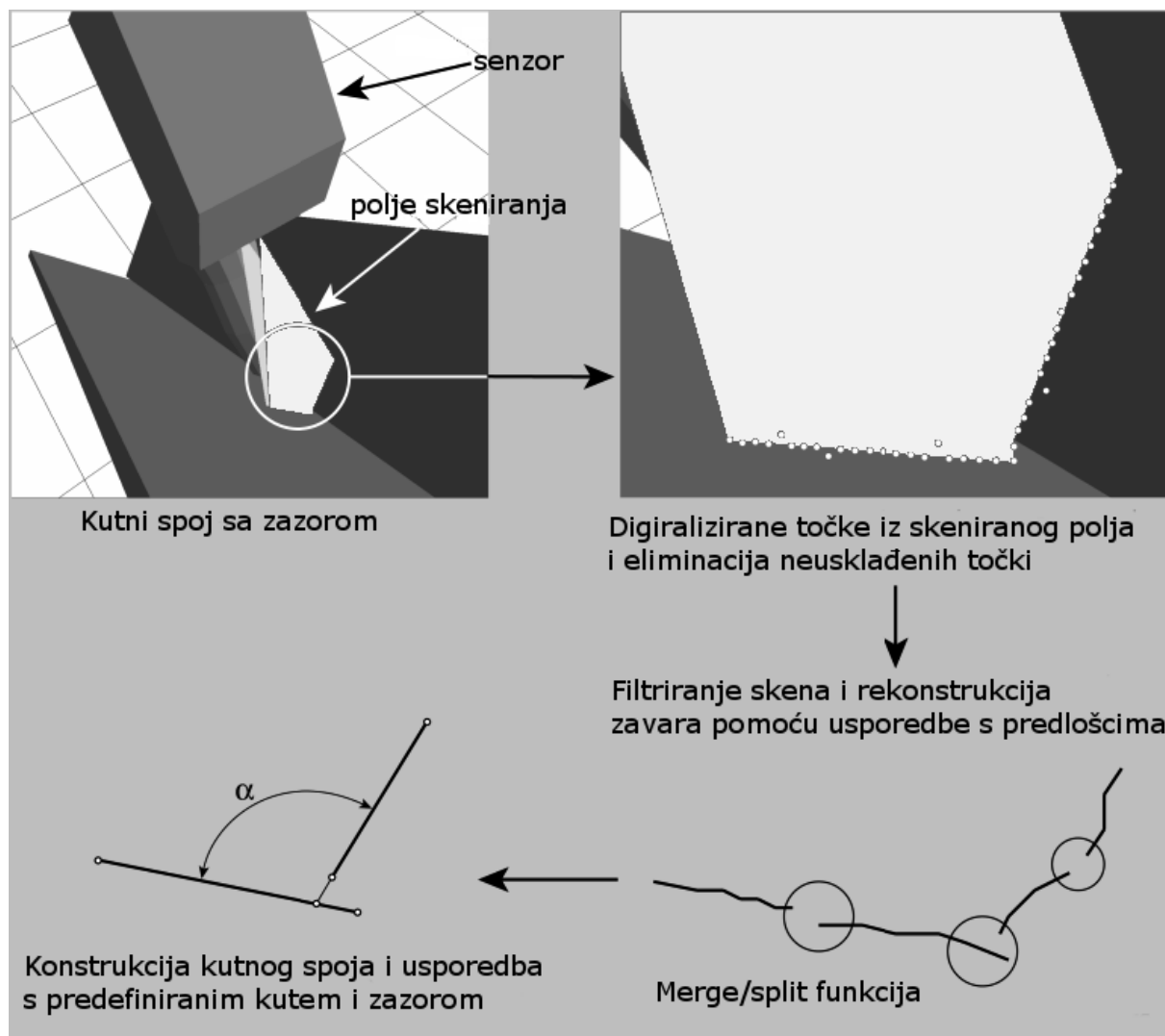
Sustavi za optičko praćenje spoja s metodom triangulacije se uglavnom koriste za usmjeravanje robota na pravi put u realnom vremenu. Međutim, njihove mogućnosti su veće od toga, te se mogu koristiti za dobivanje podataka o volumenu zavora, veličini zazora, krivom poravnanju, pripojima, itd. Ti podaci se mogu koristiti za adaptivno upravljanje kako izvora struje za zavarivanje, tako i robotskog podsustava.

Kod zavarivanja u više slojeva, prati se prvi sloj, prilikom čijeg izvođenja robot pamti put zavora. Sljedeći slojevi se mogu izvesti u odnosu na put prvog sloja, koji je baziran na stvarnoj geometriji zavora.



Slika 51. Prikaz laserskog senzora na vrhu pištolja za zavarivanje [6]

Sustav za lasersko praćenje spoja je obično pričvršćen na pištolj za zavarivanje i to tako da u svom vidnom polju ima određeni dio puta zavora ispred pištolja. To implicira da robot mora koristiti jedan stupanj slobode gibanja za poravnanje senzora s zavarom, ili mora koristiti posebno rotacijsko gibanje oko osi pištolja.



Slika 52. Proces ekstrakcije značajki spoja i segmentacije [6]

Slika 52 prikazuje primjer procesa ekstrakcije značajki spoja u segmentacije procesa, koja se odvija u slijedećim koracima:

1. Eliminacija točaka koje leže izvan polja skeniranja
2. Generacija segmentirane linije korištenjem određenog predloška spoja
3. Spajanje segmenata linije
4. Provjera usklađenosti s predlošcima i tolerancijama

Laserski skeneri su precizni i robusni senzori koji zadovoljavaju većinu zahtjeva koje postavlja proces zavarivanja. Međutim, moraju se pričvrstiti na pištolj za zavarivanje, što oduzima određeni dio prostora. Postavljaju dodatne zahtjeve za programiranje i pozicioniranje robota i pištolja za zavarivanje. Još uvijek su relativno skupi. No uz sve to, preferiraju se za praćenje zavora.

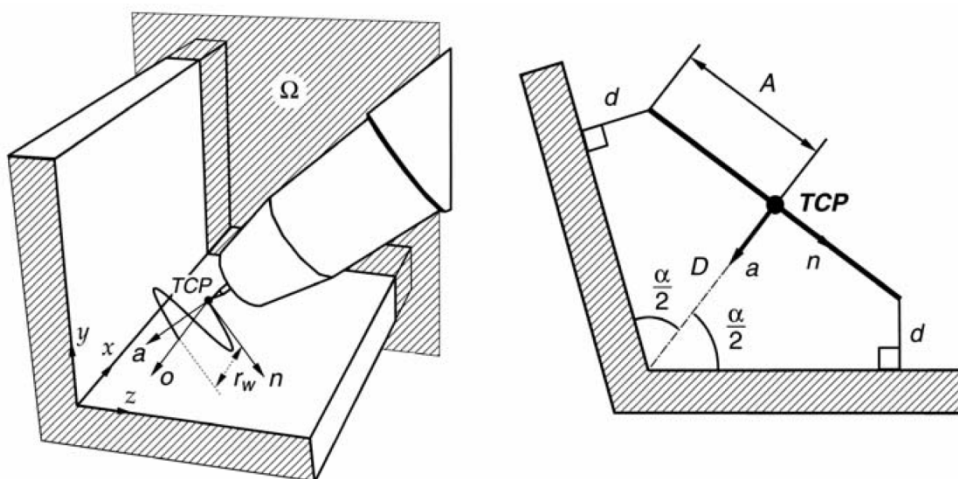
5.2.3.2.2 Elektrolučni senzori

Načelo koje stoji iza metode očitavanja kroz električni luk, razvijene u 1980-ima, je iskoristiti informacije koje daje promjena napona zavarivanja kad se mijenja udaljenost između kontaktne vodilice i izratka koji zavarujemo. Taj osnovni princip je relativno lako i jeftino koristiti, primjenjuje se za praćenje zavara kod robotiziranog zavarivanja MIG/MAG i srodnim procesima, kao što su FCAW, EPP itd.

Prema [17], približna ovisnost napona električnog luka (U), jakosti njegove struje (I) i udaljenosti između kontaktne cjevčice i izratka (l) se može izraziti pomoću formule:

$$U = \beta_1 I + \beta_2 + \frac{\beta_3}{I} + \beta_4 l$$

$\beta_1 - \beta_4$ su konstante ovisne o žici, plinu za zavarivanje i karakteristika struje. U većini slučajeva je napon konstantan a I i l variraju i to u međusobno proporcionalnoj ovisnosti. To svojstvo se koristi u robotiziranom zavarivanju uz njihanje tokom zavarivanja.



Slika 53. Centralna točka alata (TCP) i geometrija kod praćenja zavara njihanjem [6]

Kod njihanja prilikom zavarivanja (Slika 53), udaljenost između pištolja za zavarivanje i izratka varira, a posljedično se mijenja struja i napon. To se koristi uz njihajuće gibanje pištolja, obično sinusoidalno ili trokutasto.

U praksi, kod ovakvog senzora se struja mjeri „hall efekt“ senzorom ili šantom. Koristi se niskopojasni filter za prigušenje šuma. Podaci sa senzora se mogu analizirati kontinuirano ili diferencijalno, samo u točkama mijenjanja smjera. Zbog relativno male točnosti sustava, u većini slučajeva je dovoljno koristiti diferencijalnu metodu. Tako je za dobivanje pouzdanih podataka potrebno koristiti njihanje amplitude nekoliko milimetara. Iz toga proizlazi kako je

zavar proizveden ovakvim sustavom praćenja malo širi nego kod pravocrtnog gibanja, odnosno tolerancije zavara su veće. To ograničava sustav za upotrebu kod zavarivanja materijala debljih od otprilike 3 mm.

Nekad se koristi kontinuirano mjerenje promjene struje, uz uspoređivanje s predefiniranim predlošcima, za precizniju kontrolu procesa, a tako se mogu mjeriti i asimetrični oblici pripreme spoja za zavarivanje.

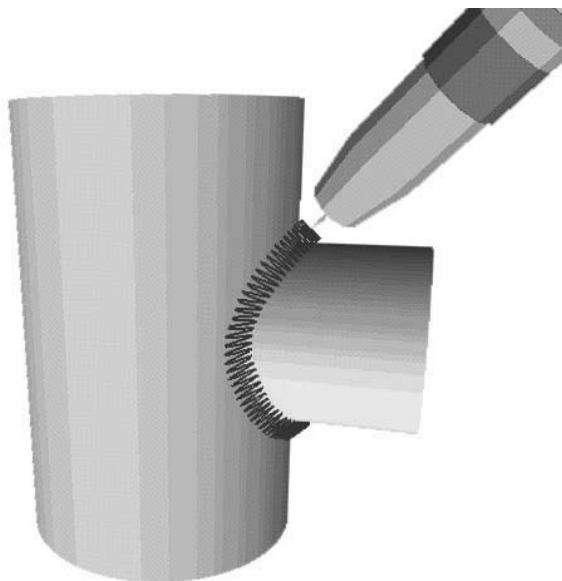
Pomoću elektrolučnog senzora, zavareni spoj se može otkriti samo tokom njihanja pištolja. Pri tome je vidno polje senzora jednako njihajućem gibanju pištolja. Ako nije detektiran zavareni spoj, ne postoji informacija kako pronaći spoj. Stoga je važno ostvariti robusnu kontrolu procesa kako robot ne bi izgubio spoj tokom praćenja, jer se neće znati automatski vratiti.

U praksi, funkcionalnost praćenja zavara se obično koristi u kombinaciji s **funkcijom traženja zavara**. Ona je osobito korisna za početnu fazu, kada robot, ako ne pronađe spoj zavara kada se počne gibati uz njihanje, postupno pomiče u predefiniranu poziciju okomitu na glavni nominalni put zavarivanja.

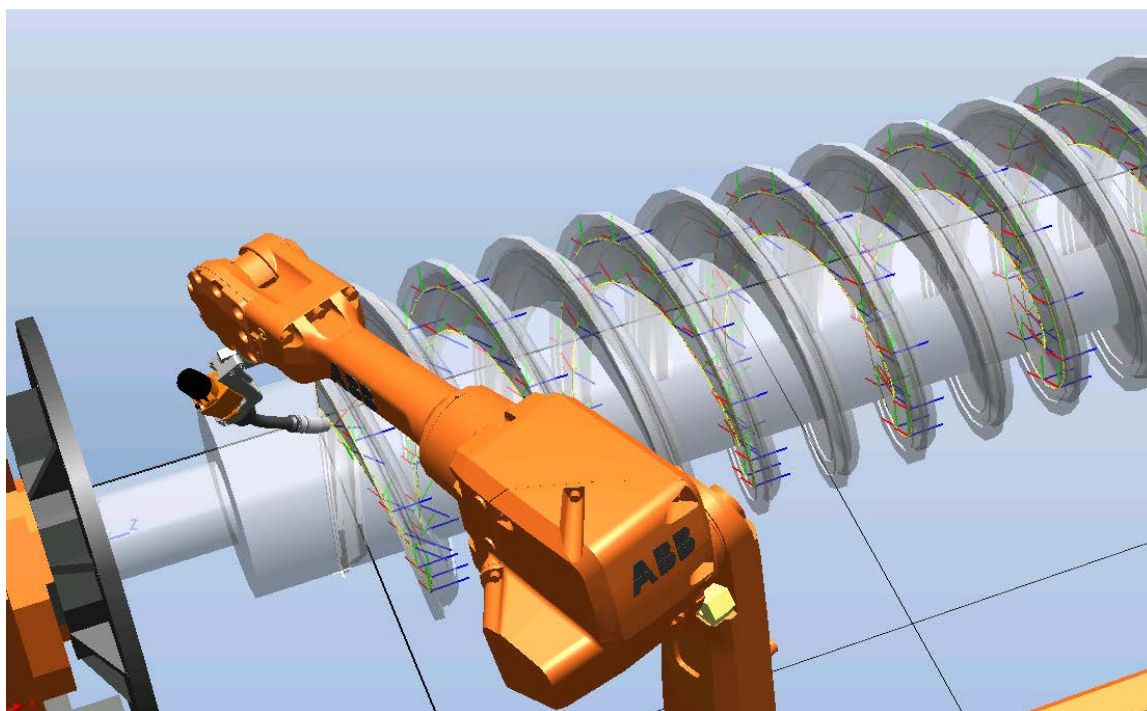
Funkcija traženja zavara se u osnovi implementira na dva različita načina:

1. Pomicanjem pištolja prema jednoj pa drugoj ploči, dok se ne ostvare kontakti, što se može detektirati kada se ostvari električni kontakt. Iz tih podataka se izračuna početna pozicija zavarenog spoja
2. Tijekom zavarivanja se odredi početna pozicija zavara, također i smjer tako da se pištolj postupno pomiče i niže dok ih ne otkrije

Kao i kod praćenja zavara laserskim skenerima, koristi se nominalni put. Kod višeprolaznog zavarivanja robot koristi mogućnost pamćenja praćenog puta i taj obrazac koristi u prolazima koji slijede.



Slika 54. Praćenje trajektorije zavarivanja pomoću senzora [16]



Slika 55. Primjer zavarivanja izratka kompleksne geometrije s neprecizno pozicioniranim dijelovima [16]

6. EKSPERIMENT

6.1 Opis eksperimenta

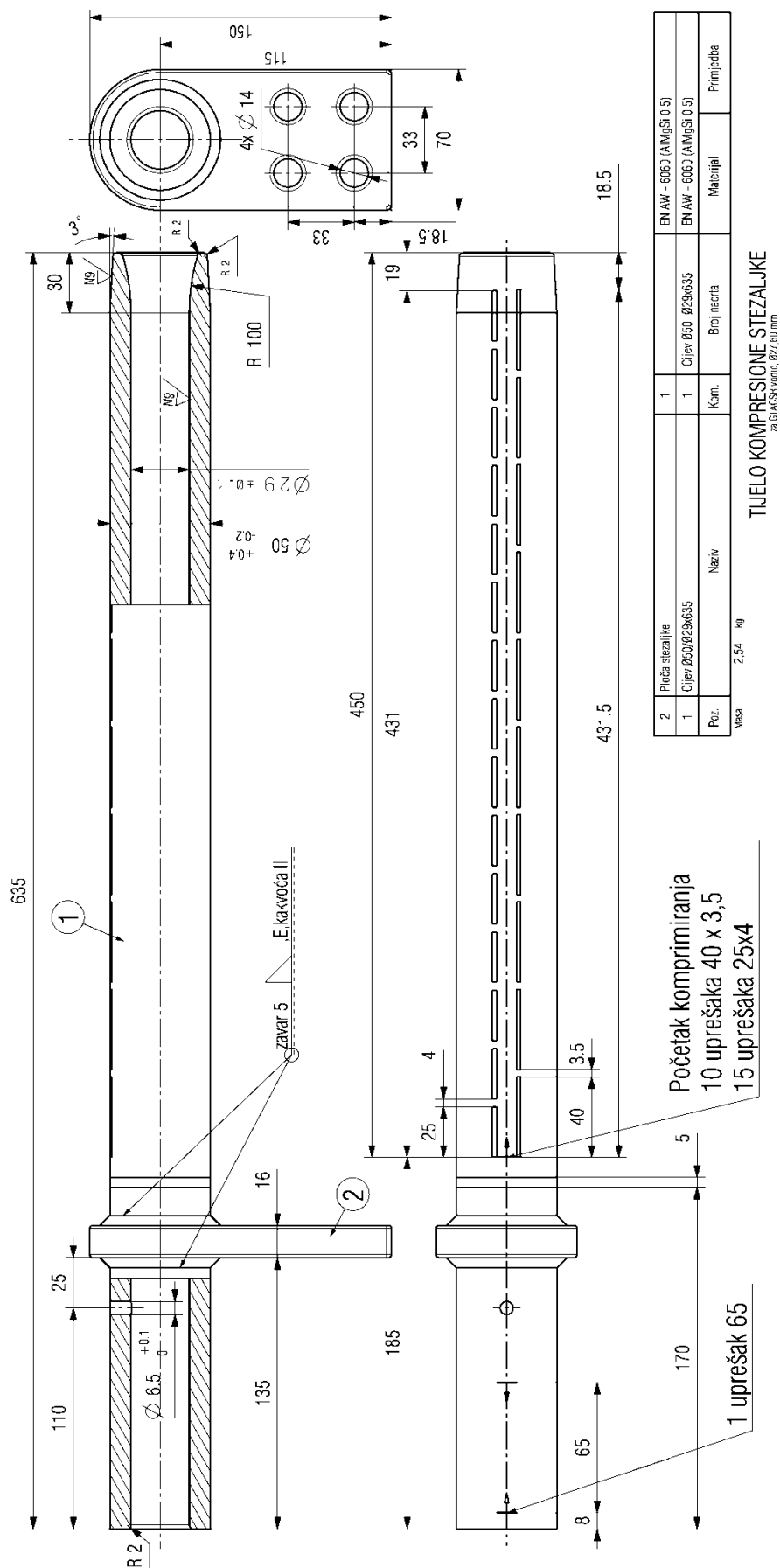
Plan eksperimenta je provedba zavarivanja uzoraka tijela zatezne kompresijske stezaljke koje se sastoji od dva dijela, (Slika 56):

1. cijevi proizvedene vučenjem od aluminijske legure EN AW 6060 T6 (AlMgSi0,5) sa strojno obrađenim krajevima,
2. ploče proizvedene strojnom obradom odvajanjem čestica od vučene aluminijske legure EN AW 6060 T6 (AlMgSi0,5).

Zavaruje se na dva načina:

1. konvencionalnim MIG postupkom u proizvodnom pogonu poduzeća Dalekovod proizvodnja d.o.o. u Velikoj Gorici,
2. robotiziranim MIG postupkom u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Cilj eksperimenta je izrada uzoraka za utvrđivanje kvalitete i proizvodnosti robotiziranog postupka zavarivanja u usporedbi s konvencionalnim postupkom na osnovi koje se određuje ekonomska isplativosti primjene robotiziranog zavarivanja tijela zatezne kompresijske stezaljke.



Slika 56. Radionički crtež tijela zatezne kompresijske stezaljke

6.2 Svojstva aluminijske legure EN AW 6060 T6 (AlMgSi0,5)

Materijal tijela kompresijske stezaljke se izrađuje od precipitacijski očvrstive aluminijske legure EN AW 6060 T6 (AlMgSi0,5). Glavni legirajući elementi su Si i Mg koji tvore očvršćavajući spoj Mg_2Si . Osnovna svojstva prikazuje Tablica 7, u Tablica 8 se navodi kemijski sastav legure.

Tablica 7. Fizička svojstva aluminijske legure EN AW 6060 (AlMgSi0,5) pri temperaturi 20 °C

Gustoća, kg/m ³	Talište, °C	Električna vodljivost, MS/m	Toplinska vodljivost, W/m·K	Koeficijent toplinskog širenja, 10 ⁻⁶ /°C	Modul elastičnosti, N/mm ²
2700	585 - 650	28 - 34	200 - 220	23,4	~70000

Tablica 8. Kemijski sastav legure EN AW 6060 (AlMgSi0,5) prema normi HRN EN 573-3

Si, %	Fe, %	Cu, %	Mn, %	Mg, %	Cr, %	Zn, %	Ti, %	Ostali, %	
								svaki	ukupno
0,30 - 060	0,10 – 0,30	maks. 0,10	maks. 0,10	0,35 – 0,60	maks. 0,05	maks. 0,15	maks. 0,10	maks. 0,05	maks. 0,15

Mehanička svojstva su osrednja (Tablica 9), izvanredno dobro se oblikuje, dobro se zavaruje i ima dobra antikorozivna svojstva. Zbog toga se koristi kao konstrukcijski materijal, za nosive elemente. Isporučuje se u obliku vučenih profila (oznaka „AW“), rastvorno žarenih i umjetno dozrijevanih (oznaka „T6“).

Zavarivanjem se smanjuju mehanička svojstva za oko 50 % od početnih vrijednosti u zoni utjecaja topline.

Tablica 9. Mehanička svojstva aluminijske legure EN AW 6060 T6 prema normi HRN EN 755-2

Stanje (oznaka) topl.obrade	Debljina stijenke, mm	Granica razvlačenja R_e , N/mm ²	Vlačna čvrstoća R_m , N/mm ²	Produljenje		Tvdroća, HB
				A, %	A_{60mm}	
T6	$3 < e \leq 25$	140	170	8	6	60

Poroznost je jedna od najčešćih grešaka kod zavarivanja aluminija. Uzrokuje je vodik, koji u materijal dopije iz atmosfere luka (vlaga, masnoće, itd.). Problem je velika topivost vodika u talini, dok je topivost u krutini oko 10 puta manja. Sloj Al oksida na OM i DM također apsorbira vodik.

Potrebno je spriječiti ulaz vodika odstranjivanjem mogućih izvora vodika i/ili omogućiti efuziju (izlaz) vodika izborom odgovarajućeg postupka i režima zavarivanja. Predgrijavanje smanjuje brzinu odvođenja topline i smanjuje vjerojatnost pojave poroznosti.

Mogu se javiti i tople pukotine. Pri tome smjer kristalizacije i veličina kristala, te sadržaj nečistoća utječu na pojavu pukotina. Utjecaj na pojavu toplih pukotina ima i veličina zrna, odnosno posredno utjecaj sastava OM i DM, tj. njihovi legirni elementi.

Opasnost od toplih pukotina se smanjuje pravilnim odabirom dodatnog materijala, s dodacima Ti, Zr i Cr do 0.1%, predgrijavanjem, kontroliranim unosom topline i pravilnom tehnikom zavarivanja i toplinskom obradom nakon zavarivanja.

Toplinska obrada ovakvih legura se provodi u tri koraka:

- Homogenizacija na 470 – 530 °C
- Hlađenje određenom brzinom
- Dozrijevanje na sobnoj ili povišenoj temperaturi pod kontrolom (umjetno dozrijevanje)

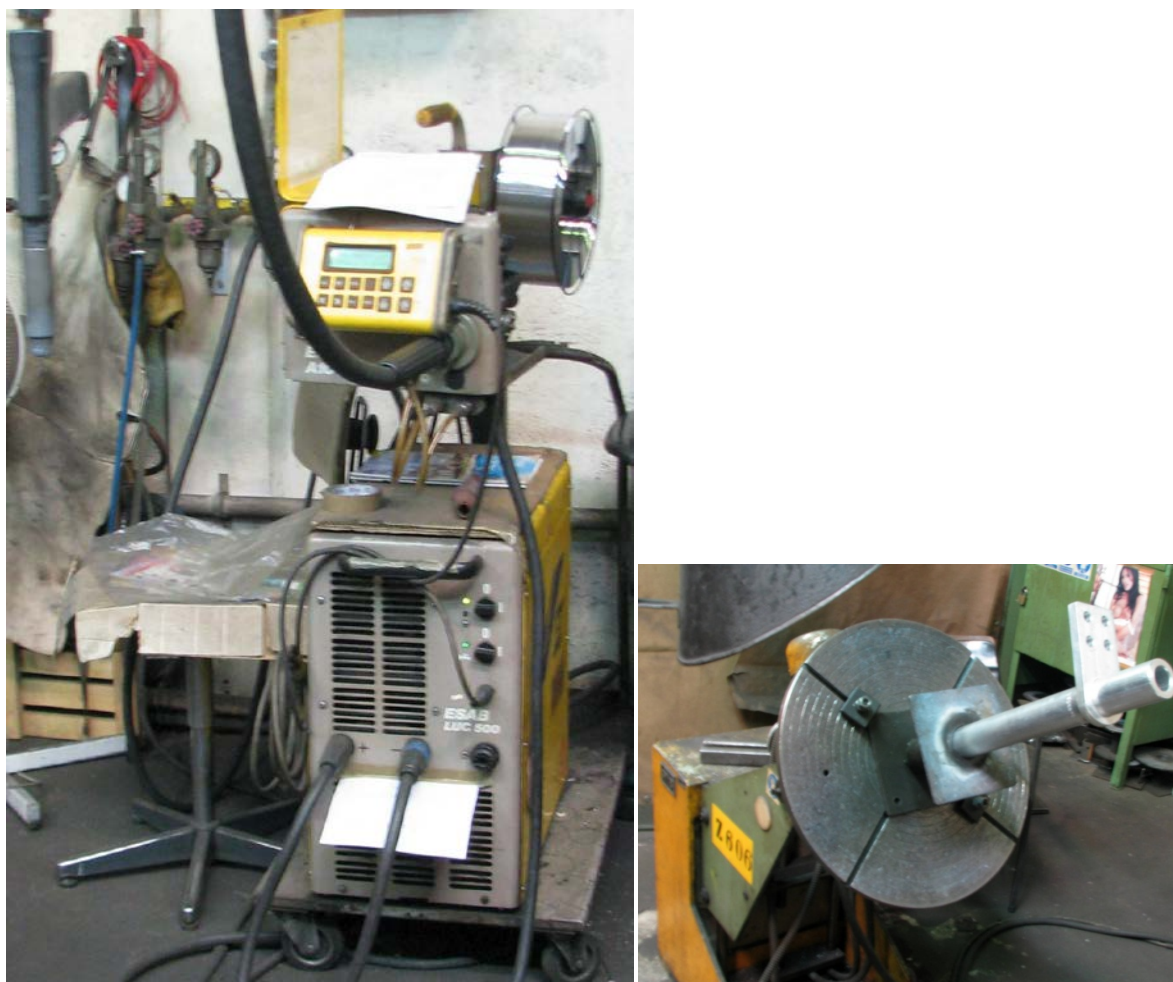
Međutim, toplinskom obradom se gube mehanička svojstva, pa je bolje koristiti druge opcije za smanjivanje opasnosti od pukotina, predgrijavanjem i legiranjem kroz dodatni materijal.

6.3 Oprema za zavarivanje

6.3.1 Oprema za ručno zavarivanje

Za ručno MIG zavarivanje uzorka opisanog u ovom radu se koristi sljedeća oprema (Slika 57):

- izvor struje za zavarivanje ESAB LUC 500,
- sustav za dodavanje žice za zavarivanje ESAB A10-MED44 s 4 kotačića i 2 pogonska motora,
- ručno upravljani nagibni pozicioner s jednom osi rotacije,
- naprava za prihvat izratka.



Slika 57. Izvor struje za MIG zavarivanje s dodavačem žice (lijevo) i pozicioner (desno)

6.3.2 Oprema za robotizirano zavarivanje

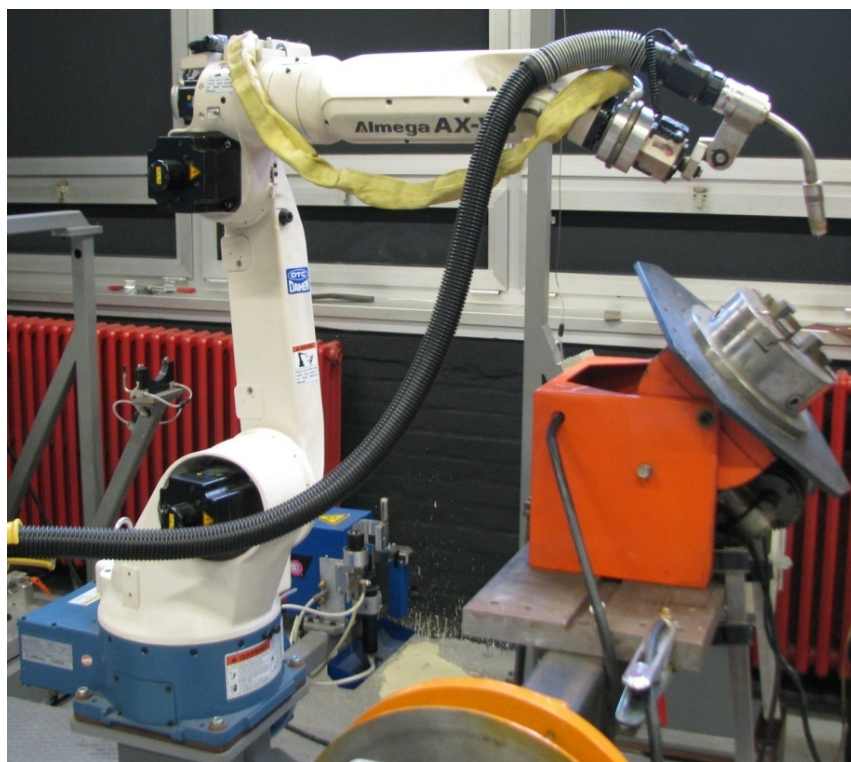
Robotizirano zavarivanje uzoraka se izvodilo na robotskom sustavu Varstroj VRC-1G MIG + 1G TIG / 1dm, kojeg čine slijedeći glavni dijelovi (Slika 58):

1. robotski manipulator OTC Almega AX-V6,
2. upravljačka jedinica Almega AX-C s funkcijom MultiSynchronmotion,
3. glavni električni ormar za priključivanje električne jedinice robota i izvora struje za zavarivanje,
4. izvorom struje za zavarivanje MIG/MAG: DP 400
5. izvorom struje za zavarivanje TIG: VARTIG 3500 AC/DC
6. glava za zavarivanje i-cat MIG/MAG,
7. glava za zavarivanje i-cat TIG,
8. elektrolučni senzor AXLAR2
9. uređaj za automatsko čišćenje sapnice pištolja za zavarivanje, rezačem žice i aplikatorom sredstva protiv naljepljivanja kapljica,
10. jednoosni pozicioner P250V ROBO s potpornim uležištenjem,
11. Dodatni pozicioner



Slika 58. Robotski sustav Varstroj VRC-1G MIG + 1G TIG / 1dm

Glavni dio robotske stanice je robotski manipulator OTC Almega AX-V6 (Slika 59) koji se sastoji od robotske ruke s tri rotacijske slobode gibanja i ručnog zgloba s još tri rotacije, što čini šest stupnja slobode gibanja robotskog manipulatora. Na vrh ručnog zgloba je pričvršćen pištolj za zavarivanje koji se može promijeniti pomoću sustava za automatsku promjenu pištolja. Opisani robotski sustav ima dvije stanice za spremanje pištolja, jednu za MIG/MAG a drugu za TIG pištolj. Ručni zglob je opremljen „shock“ senzorom koji zaustavlja robot u slučaju sudara.



Slika 59. Robotski manipulator OTC Almega AX-V6

Glavni dio upravljačke jedinice je programibilni logički kontroler (PLC) koji je u slučaju navedenog robotskog sustava, kao i većine modernih industrijskih robota, ustvari PC kompatibilno računalo industrijske klase. To omogućava korištenje široko rasprostranjenih i isprobanih standardnih rješenja hardverske opreme i razvojnih sustava za programiranje.

Svi dijelovi robotske stanice su povezani s upravljačkom jedinicom preko Device Net sabirnice i interpretiranjem digitalnih i analognih signala.

Pomoću privjeska za učenje (engl. *teach pendant*) se upravlja upravljačkom jedinicom. Tako se neposredno upravlja svim dijelovima robotske stanice sa središnjeg mjesta i to po svim upravljivim parametrima.

Osim toga, najvažnija funkcija privjeska za učenje je mogućnost programiranja robotske stanice na licu mjesta („on line“ programiranje) pomoću jednostavnog ali sveobuhvatnog programskog jezika koji potom upravljačka jedinica interpretira i izvršava.

Upravljačka jedinica također pohranjuje programe lokalno i/ili na server, ako se poveže na standardnu lokalnu računalnu mrežu.

Drugi način programiranja robotske stanice je „offline programiranje“, koje se vrši pomoću simulacije robotske stanice na osobnom računalu korištenjem specijalnih programskih paketa, te se gotov program prebacuje na upravljačku jedinicu.

Kada se robotska stanica isprogramira, operater pokreće i prema potrebi zaustavlja program pomoću vrlo jednostavnog operatorskog panela, (Slika 60).



Slika 60. Upravljačka jedinica Almega AX-C (lijevo), privjesak za učenje (sredina) i operatorski panel (desno)

Slika 61 prikazuje izvor struje za MIG/MAG zavarivanje OTC Daihen DP 400 s rashladnim uređajem (lijevo) i izgledom kontrolne ploče (desno).

Izvor struje za zavarivanje koristi sinergijske programe za parametre zavarivanja. Potpuno je integriran u robotski sustav za zavarivanje preko digitalne komunikacijske sabirnice.



Slika 61. Oprema za robotizirano MIG zavarivanje

Pozicioner P250V ROBO ima jednu rotacijsku os koja je sinkronizirana s gibanjem robotskog manipulatora i zato se smatra sedmom, „vanjskom“, osi robotskog sustava.

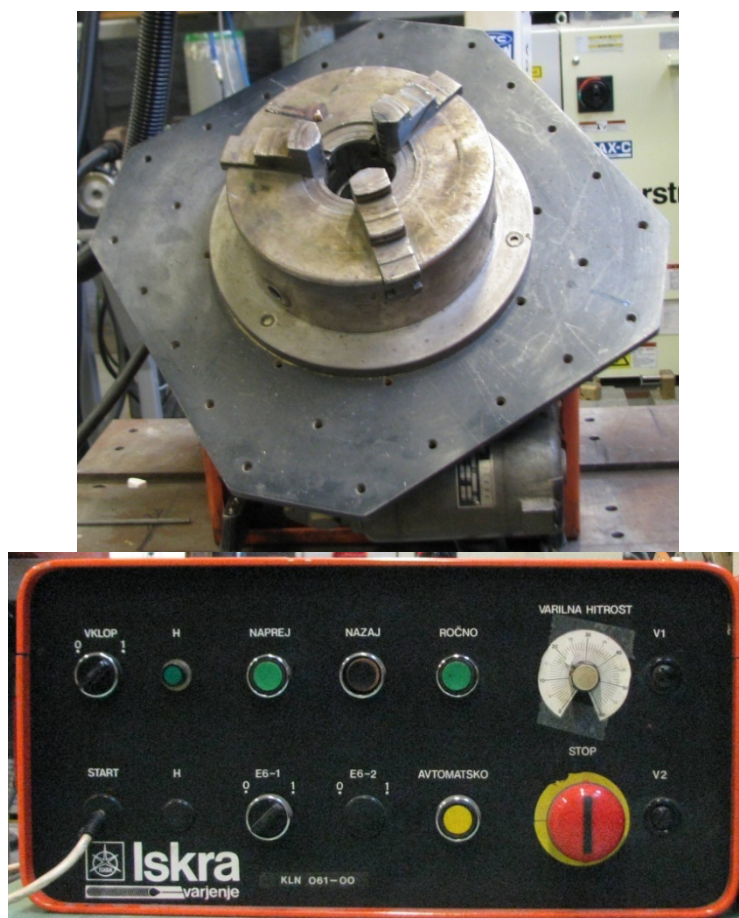
Međutim, navedeni pozicioner nije nagibni, njegova radna os se može koristiti samo u vodoravnom položaju.

To u ovom slučaju nije prikladno, jer se je zavarivanje aluminija optimalno u PA položaju.

Koristi se dodatni manipulator Iskra KLN 061-00 (Slika 62) s mogućnošću podešavanja kuta nagina i ručno upravljanom brzinom vrtnje.

Pozicioner je kalibriran za namjenu zavarivanja uzoraka tijela kompresijske stezaljke s cijevi promjera 50 mm, odnosno određeni su programi brzina zavarivanja, (Tablica 10).

Vrijeme koje je potrebno pozicioneru za jedan okret je važno kako bi se mogao odrediti i programirati trenutak završetka zavarivanja.



Slika 62. Ručni pozicioner Iskra KLN 061-00

Tablica 10. Programi rada pozicionera Iskra KLN 061-00

Program	Vrijeme jednog okreta, s	Brzina zavarivanja, v_{zav} , cm/min
10	33	28,6
11	27	34,9
12	22	42,8
13	20	47,1
14	17	55,4
15	15	62,8
16	13,5	69,8
17	12,5	75,4
18	11,5	82,0
19	10,5	89,8
20	9,5	99,2

Slika 63 prikazuje jednostavnu napravu za pozicioniranje, koja je konstruirana za potrebu eksperimenta.

Pozicioner osigurava položaj osi izratka, ali korištenje posebne naprave je potrebno za određivanje položaja ploče kompresijske spojnice, odnosno određivanja položaja zavarenog spoja, koji mora biti isti kod svakog stezanja pri korištenju robotiziranog postupka zavarivanja.

**Slika 63. Naprava za pozicioniranje izratka**

6.4 Optimizacija parametara robotiziranog zavarivanja

U ovom poglavlju su opisani primjeri zavarenih spojeva prilikom podešavanja i programiranja robotskog sustava za zavarivanje zateznih kompresijskih stezaljki.

Prvo je robotska stanica konfigurirana za zavarivanje aluminijske promjenom žice za zavarivanje, kotačića sustava za dobavu žice, kontaktne vodilice i plina za zavarivanje.

Potom je ugrađen i kalibriran prikladan pozicioner i izrađena naprava za prihvata izratka, koji su opisani u prethodnom poglavlju.

Ručno zavarivanje je izvedeno žicom promjera 1.6 mm, (Tablica 11, Tablica 13). Robotski sustav koristi žicu promjera 1.2 mm, (Tablica 12, Tablica 13). Stoga se ne može jednostavno preuzeti tehnologija ručnog postupka za početne parametre robotiziranog zavarivanja.

Brzina ručnog zavarivanja se koristi kao početni parametar robotiziranog procesa. Ostali parametri su odabrani kako bi se dobio sličan unos topline kao kod ručnog zavarivanja, što nije moguće ostvariti jednostavnim unošenjem parametara jer sinergijski program izvora za zavarivanje nije za to predviđen, već korištenjem korekcijskih parametara. Nakon toga je povećavana brzina zavarivanja i kontroliran izgled zavarivanja.

Nakon toga je izrađen robotski program za početno probno zavarivanje.

Prvi problem, koji je karakterističan za zavarivanje aluminijske, je primijećen neposredno nakon pokretanja programa za zavarivanje.

Malo istrošena teflonska vodilica žice za zavarivanje ne predstavlja problem kod zavarivanja ostalih materijala, međutim u kombinaciji sa aluminijskom žicom razmjerno malog promjera odmah uzrokuje zastoj koji rezultira taljenjem kontaktne vodilice i oštećivanjem sapnice plina za zavarivanje. Potrebno je zamijeniti kontaktnu vodilicu i koristiti novu teflonsku vodilicu žice za zavarivanje.

Proizvođači korištenih žica za zavarivanje na različit način deklariraju kemijski sastav dodatnog materijala, (Tablica 11, Tablica 12). Prema tim podacima dodatni materijali su sličnog kemijskog sastava.

Tablica 11. Kemijski sastav navara izvedenog žicom UTP A 495 Mn (AlMg4.5Mn)

Mn, %	Mg, %	Cr, %	Ti, %
0,9	5,0	0,25	0,25

Tablica 12. Deklarirani sastav žice za zavarivanje Lincoln Electric LNM AlMg5

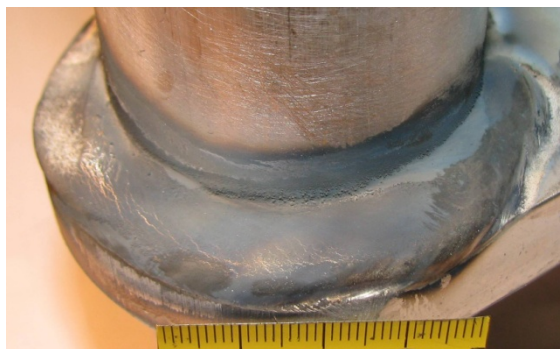
Si, %	Fe, %	Cu, %	Mn, %	Mg, %	Cr, %	Zn, %	Ti, %	Be, %
maks. 0,25	maks. 0,40	maks. 0,10	0,05 – 0,20	4,50 – 5,50	0,05 – 0,20	maks. 0,10	0,06 – 0,20	maks. 0,0003

Tablica 13 prikazuje deklarirana mehanička svojstva navara izvedenih žicama korištenim u eksperimentu. Na osnovi navedenih podataka se zaključuje kako zavari korištenim žicama imaju slična mehanička svojstva.

Tablica 13. Usporedba mehaničkih svojstava žica UTP A 495 Mn (AlMg4.5Mn) i LNM AlMg5

	Promjer žice, mm	Granica razvlačenja, N/mm ²	Vlačna čvrstoća, N/mm ²	Produljenje, %
LNM AlMg5	1,2	110 - 120	240 - 296	17 - 26
UTP A 495 Mn (AlMg4,5Mn)	1,6	> 130	> 280	> 17

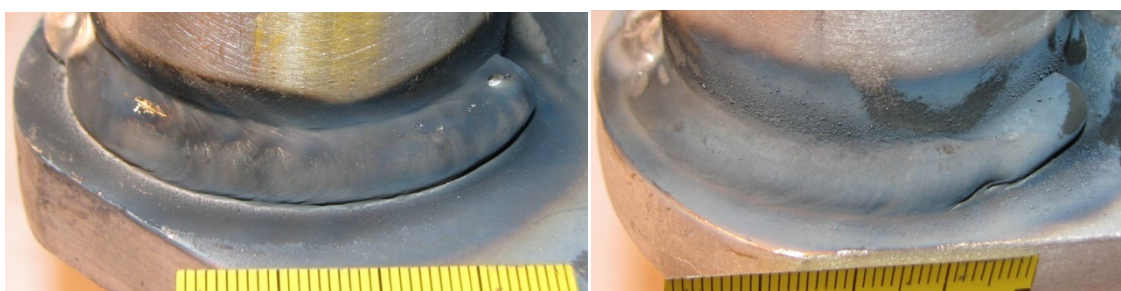
Prvi probni uzorak je zavaren u PB položaju s rotiranjem cijevi u okomitoj ravnini, (Slika 64). Uz ostale probleme, primjećuje se „curenje“ taline zbog nepovoljnog položaja zavarivanja.



Slika 64. Probni uzorak zavaren u PB položaju

Zakretanjem pozicionera za 45° u PA položaj otklonjen je problem „curenja“ taline. Međutim, javlja se naljepljivanje taline, odnosno nedovoljna penetracija zavara u osnovni materijal, (Slika 65).

Promjenama osnovnog parametra sinergijskog programa zavarivanja koji je jačina struje zavarivanja ili brzina dodavanja žice i brzine zavarivanja, dobio se samo veći ili manji volumen nalijepljene taline, (Slika 65),



Slika 65. Probni uzorci s greškom naljepljivanja

Slika 66 prikazuje zavar izveden povećanjem korekcijskog parametra „*arc tuning*“ na maksimalnu vrijednost, uz odmicanje pištolja za zavarivanje od pripreme, te pri velikoj struji i maloj brzini zavarivanja.

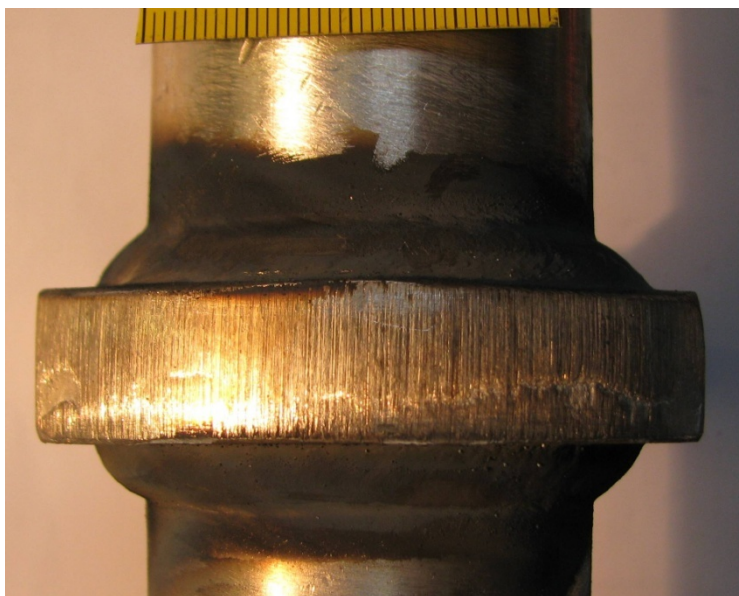
Smanjenjem struje zavarivanja i/ili povećanjem brzine zavarivanja opet se pojavljuje greška naljepljivanja zavora.



Slika 66. Probni uzorak uz korištenje maksimalne vrijednosti korekcijskog parametra "*arc tuning*"

Konačno, povećanjem korekcijskog parametra „*Arc characteristic*“, kojime se mijenja oblik impulsa zavarivanja, postignuta je dovoljna količina unosa topline za ispravnu penetraciju zavora u osnovni materijal kompresijske spojnice.

Time su određeni parametri za zavarivanje kvalitetnog referentnog uzorka robotiziranog zavarivanja, (Slika 67).



Slika 67. Uzorak "R"

Vizualnim pregledom uzorka „R“ se primjećuje se sloj oksida na površini zavora, (Slika 67). Radi se većinom o oksidu magnezija, djelomično oksidu aluminijska. Njegov uzrok je korištenje neprikladne sapnice pištolja za zavarivanje. Utjecaj na stvaranje oksida imaju i zaštitni plin za zavarivanje koji sadrži nečistoće i oksidirana žica za zavarivanje.

Ovakvi oksidi nemaju negativan utjecaj na kvalitetu zavarenog spoja, ali poskupljuju proizvod zbog potrebe dodatne operacije čišćenja.

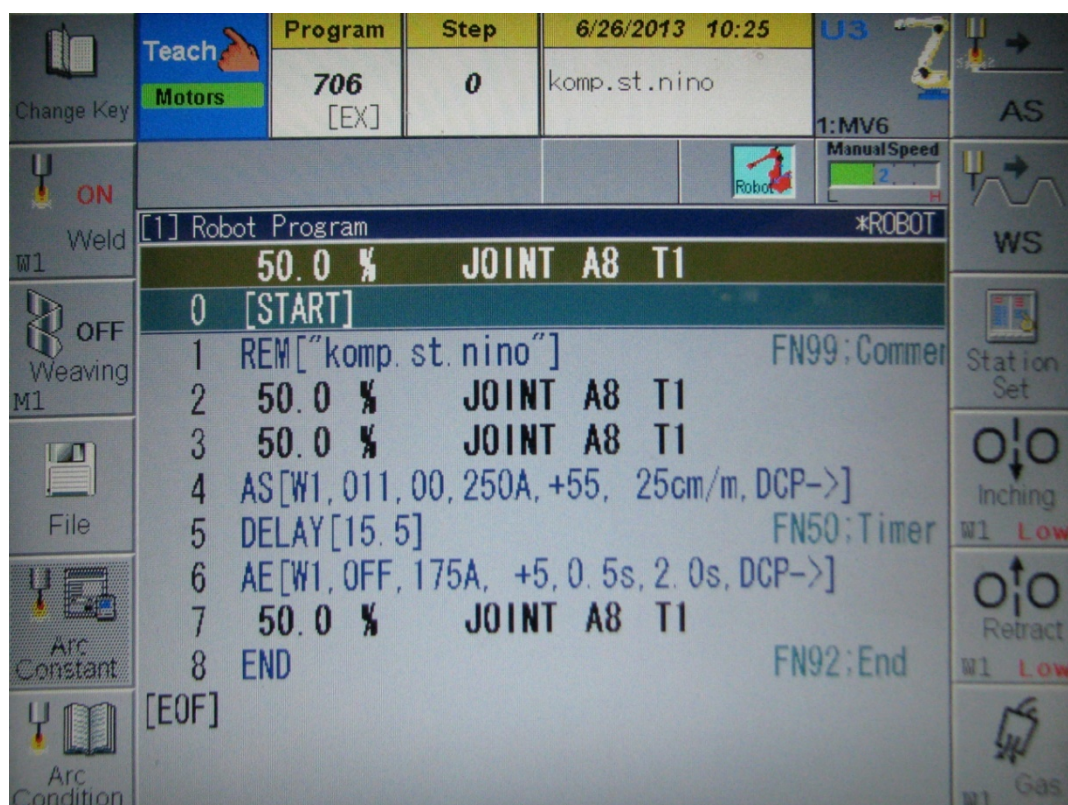
6.4.1 Program za zavarivanje uzorka „R“

Za zavarivanje uzorka „R“ je primijenjena metoda „on line“ programiranja robotske stanice“.

Slika 68 prikazuje robotski program za zavarivanje uzorka.

Objašnjenje naredbi robotskog programa je kako slijedi:

0. Oznaka početka programa
1. Komentar
2. Dovođenje pištolja za zavarivanje u pripremni položaj
 - 50.0 % - brzina gibanja robota
 - JOINT – interpolacija gibanja. U ovom slučaju se radi o gibanju za pozicioniranje. Npr. LIN naredba bi dala radno pravocrtno gibanje s konstantnom brzinom.
 - A8 – određuje preciznost gibanja (engl. *accuracy*). Argument 8 određuje najveću stupanj preciznosti gibanja.
3. Primicanje pištolja u položaj za zavarivanje
4. Pozivanje zavarivačkog potprograma; početak procesa zavarivanja. (AS – engl. *arc start*). Uređivanjem ove programske linije se ulazi u potprogram za zavarivanje (Slika 69).
5. Vrijeme za koje je aktivan proces zavarivanja; mora odgovarati podešenom vremenu za kojeg manipulator napravi jedan puni obrtaj.
6. Pozivanje potprograma za kraj procesa zavarivanja. On definira parametre za završetak zavora prije nego se isključi električni luk (AE – engl. *arc end*).
7. Odmicanje pištolja iz položaja za zavarivanje u pripremni položaj
8. Oznaka kraja programa

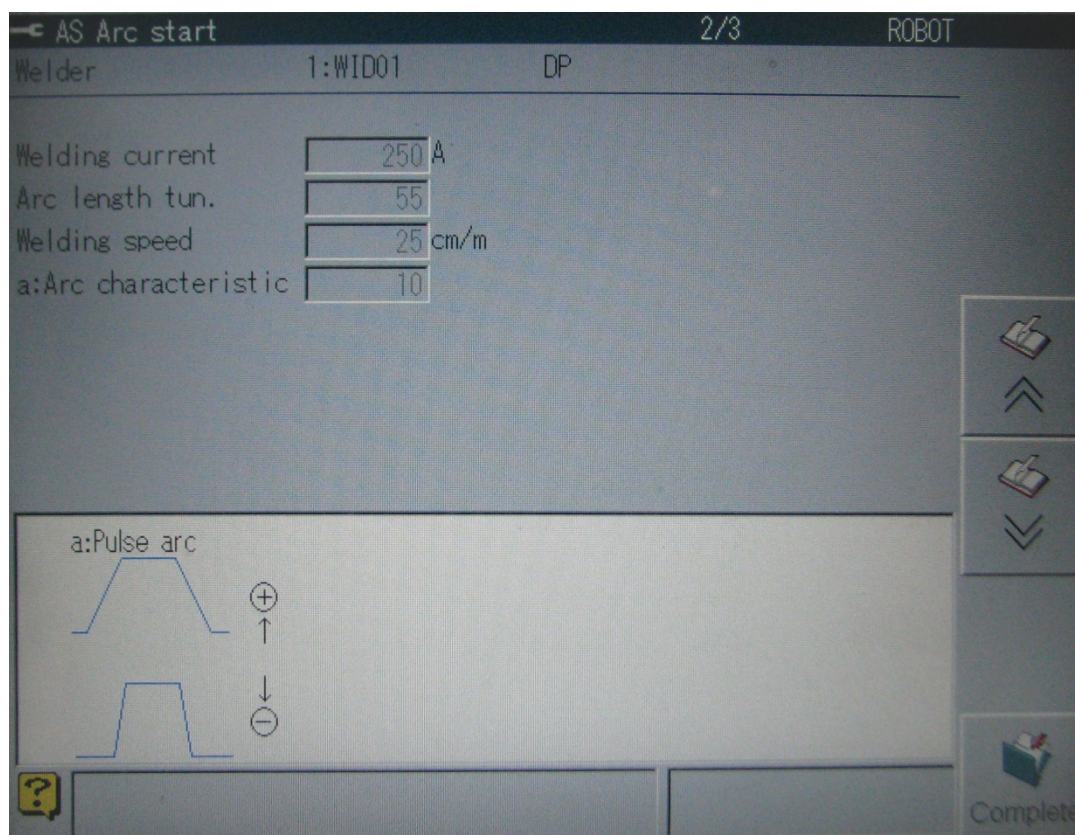


Slika 68. Robotski program za zavarivanje uzorka "R"

Slika 69 prikazuje izbornik 2/3 zavarivačkog potprograma, u kojem se definira osnovni parametar sinergijskog upravljanja i korekcijski parametri zavarivanja, koji su, kao što se vidi iz prethodnog dijela izlaganja, ključni za ostvarivanje kvalitetnog zavarenog spoja aluminija.

Parametri u ovom izborniku su:

- Welding current – struja zavarivanja. Osnovni parametar sinergijski upravljanog zavarivanja. Osim struje zavarivanja, u izborniku 1/3 se može odabrati i brzina dodavanja žice kao osnovni parametar zavarivanja.
- Arc length tuning – korekcijski parametar koji utječe na napon električnog luka. Veći napon omogućava širi zavar i bolje čišćenje oksida kod zavarivanja aluminija.
- Welding speed – brzina zavarivanja, koja je također osnovni parametar zavarivanja i to programirljiv u slučaju korištenja robotske stanice za zavarivanje.
Ovdje definirana brzina premošćuje vrijednost brzine zavarivanja (interpolacije) određene u glavnom robotskom programu.
- a: Arc characteristic – korekcijski parametar koji utječe na oblik impulsa zavarivanja. Veća vrijednost rezultira većem unosu topline u osnovni materijal zbog povećanja trajanja vršne struje impulsa.



Slika 69. Zavarivački potprogram za zavarivanje uzorka "R"

7. USPOREDBA RUČNOG I ROBOTIZIRANOG ZAVARIVANJA

Uzorak „H“ je ručno zavaren pomoću opreme opisane u poglavlju 6.3.1 uz korištenje prethodno razrađenog i atestiranog postupka zavarivanja koji se koristi za proizvodnju tijela aluminijskih kompresijskih stezaljki.



Slika 70. Kut pištolja prilikom ručnog zavarivanja (gore) i robotskog zavarivanja (dolje)

Zavarivanje uzorka „H“ je izvedeno sinergijskim programom „AlMg5“, odabirom brzine zavarivanja 7,3 m/min i korištenjem navedenih parametara zavarivanja (Tablica 14). Manipulator je podešen na kut od 45 ° kako bi se osigurao PA položaj zavarivanja, s fiksnim pištoljem i rotacijom cijevi (Slika 57). Korištena je lijeva tehnika zavarivanja, određena kutom pištolja (Slika 70). U pripremu uzorka je uključeno strojno pranje prije zavarivanja.

Tablica 14. Usporedba parametara ručnog i robotiziranog zavarivanja

	Uzorak H (ručno)	Uzorak R (robotizirano)
Postupak zavarivanja	131 P (MIG)	131 P (MIG)
Osnovni materijal	EN AW 6060 T6 (AlMgSi0,5)	EN AW 6060 T6 (AlMgSi0,5)
Položaj zavarivanja	PA (rotacija cijevi)	PA (rotacija cijevi)
Promjer žice, mm	1,6	1,2
Žica za zavarivanje	UTP A 495 Mn (AlMg4,5Mn)	Lincoln Electric LNM (AlMg5)
Zaštitni plin	I1 (100 % Ar)	I1 (100 % Ar)
Protok plina, l/min	20	21
Struja zavarivanja, A	240	250
Napon zavarivanja, V	26	28
Brzina dodavanja žice, m/min	7,3	13
Brzina zavarivanja, cm/min	34	63
Vrijeme zavarivanja jednog izratka, s	28	15
Unos topline, kJ/mm	0,88	0,53
Visina zavara, mm	4,9	5,6
Površina presjeka zavara, mm ²	44,5	37
Površina presjeka nataljenog dodatnog materijala, mm ²	28,5	26,1

7.1 Vizualna kontrola zavarenog spoja

Ručno izvedeni zavar je čist, širok, jednolik i konkavnog oblika, što daje dobar estetski izgled, ali stavlja u pitanje konstrukcijski zahtijevanu visinu zavora od 5 mm, (Slika 71, Slika 73).

Uz širok zavar, vidi se vrlo široka zona čišćenja materijala električnim lukom zbog korištenja žice debljine 1,6 mm. Općenito, čišćenje sloja oksida je odlično izvedeno, što ostavlja mogućnost zavarivanja s manjim kutom pištolja, pomaknutog više prema neutralnom položaju, kako bi se dobilo veće nadvišenje zavora.

Vidljiv je pravilno izveden završni krater, što je omogućeno dobrim sinergijskim programom za početak i završetak zavora i vještinom zavarivača koji je na kraju zavarivanja nožnom papučom zaustavio manipulator kako bi zadržao pištolj u kraju zavora, te je nakon isključenja električnog luka dovoljno vremena štitio završni krater inertnim plinom za zavarivanje.

Zavar izveden robotiziranim postupkom je uži, konveksnog oblika, (Slika 72, Slika 74).

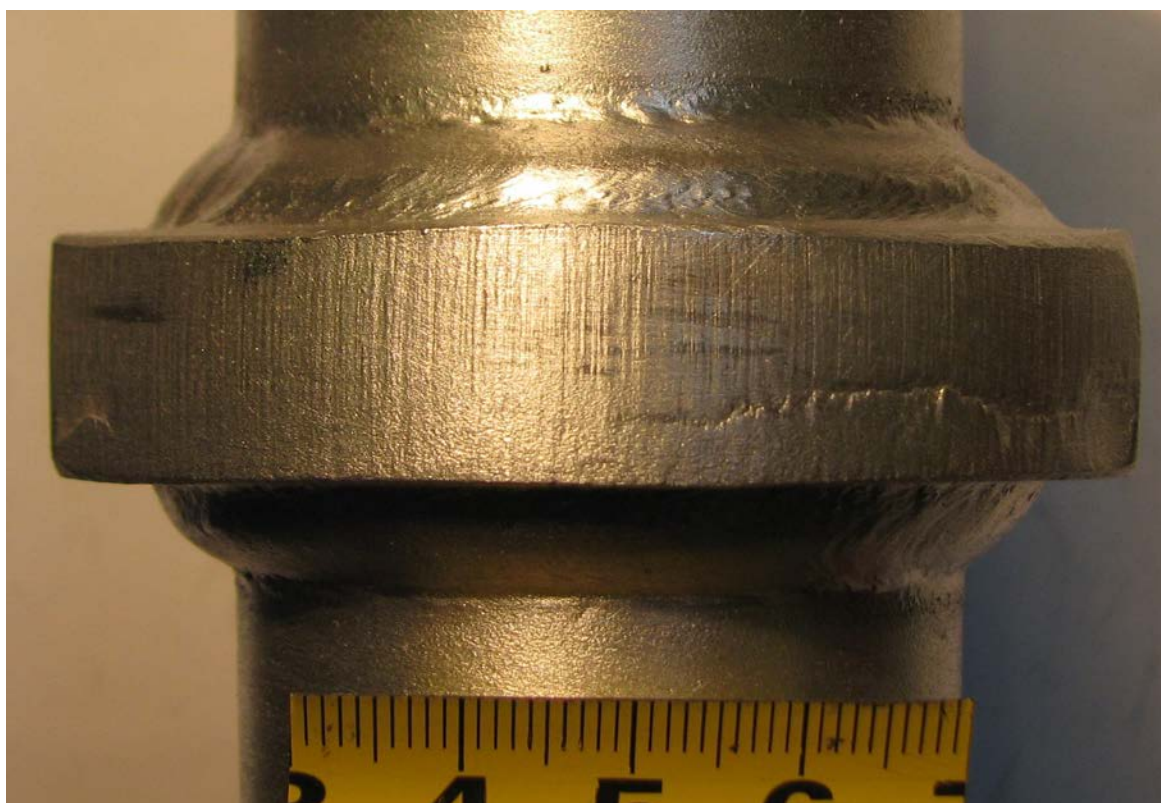
Primjetna je veća visina zavora nego kod ručnog postupka.

Zavar je izveden vrlo jednoliko i bez vidljivih grešaka.

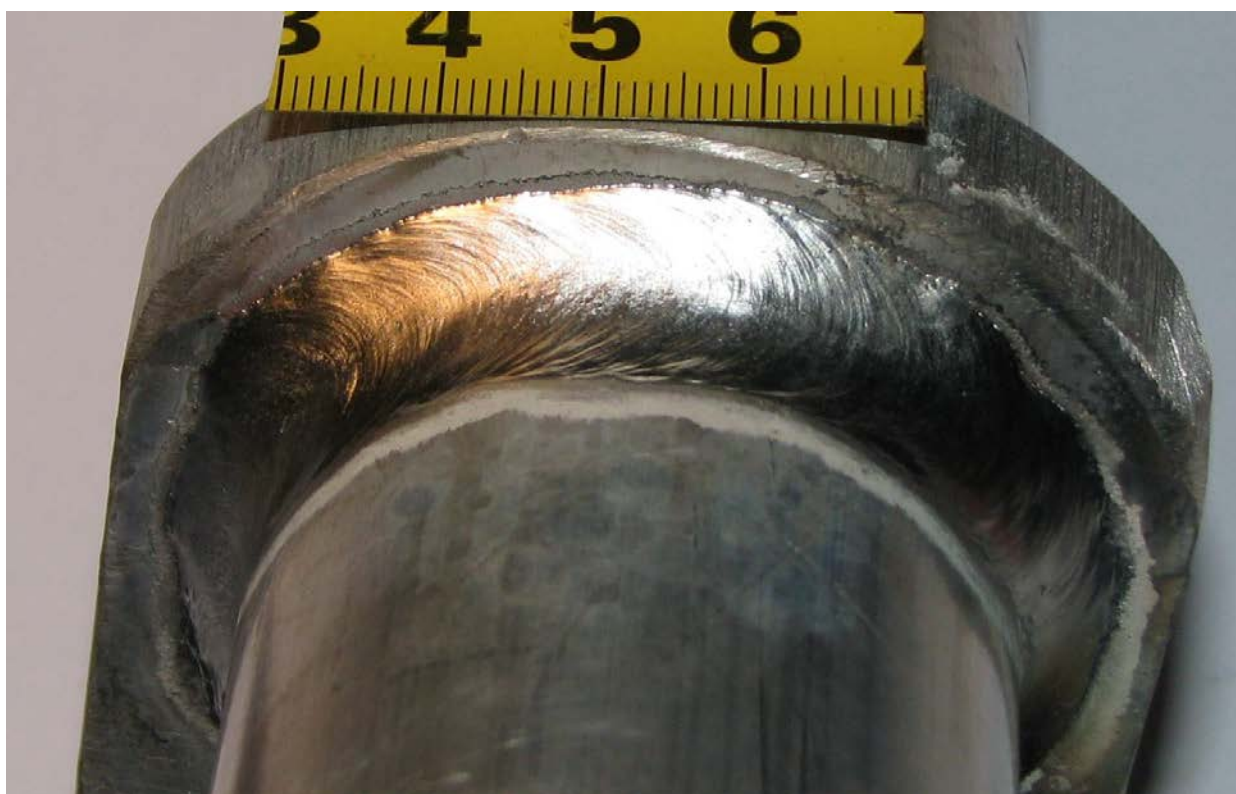
Slika 72 prikazuje malo odstupanje u izgledu profila zavora, što je uzrokovano nepreciznostima stezanja i pozicioniranja izratka prije zavarivanja, koje postoje i kod ručnog postupka ali je isti manje osjetljiv na tolerancije pripreme izratka.



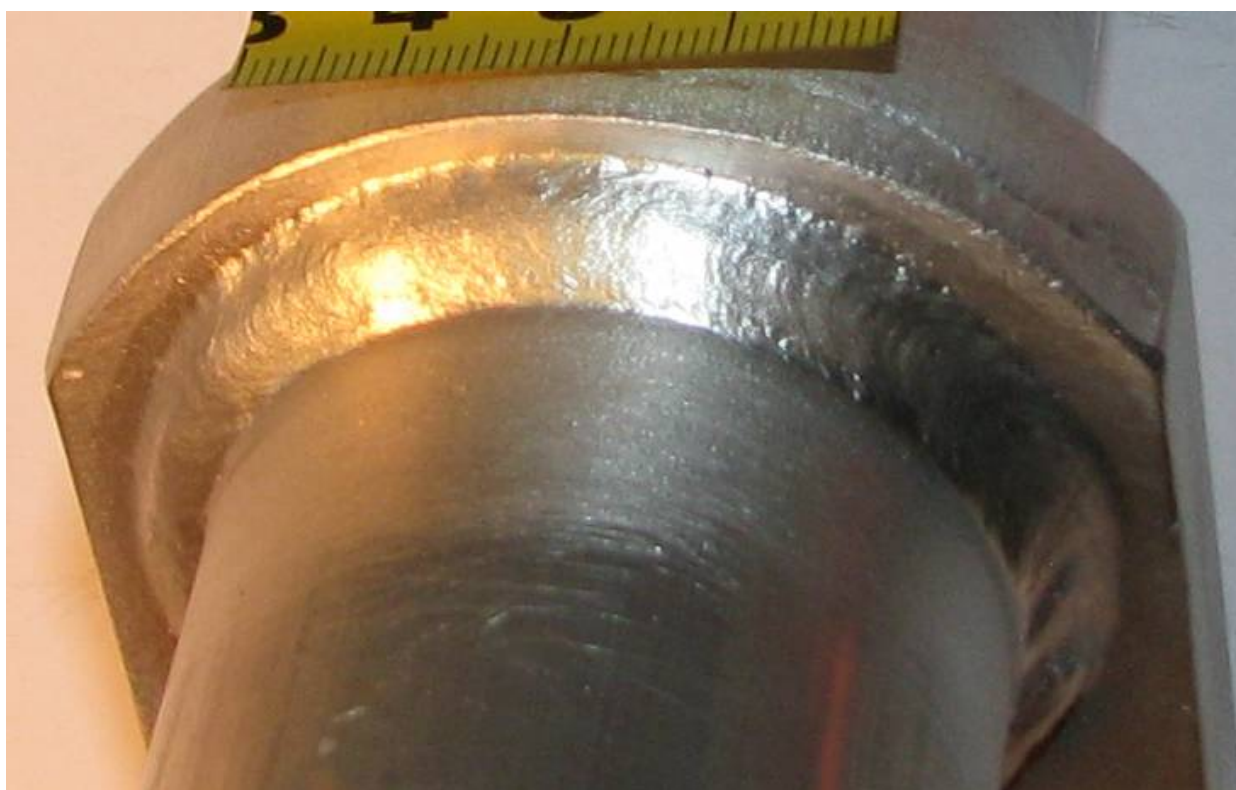
Slika 71. Izgled zavora uzorka kompresijske stezaljke zavarenog ručnim postupkom



Slika 72. Izgled zavora uzorka kompresijske stezaljke zavarenog robotiziranim postupkom



Slika 73. Izgled zvara uzorka kompresijske stezaljke zavarenog ručnim postupkom



Slika 74. Izgled zvara uzorka kompresijske stezaljke zavarenog robotiziranim postupkom

7.2 Kontrola makro izbrusaka presjeka zavarenih spojeva

Kvaliteta zavarenog spoja je osim kontrole vanjskog izgleda ispitana i vizualnom kontrolom makro izbrusaka presjeka zavarenih uzoraka, što je u skladu sa zahtjevima norme HRN EN ISO 15614-2.

Makro izbrusci su pripremljeni prerezivanjem zavarenih uzoraka „H“ i „R“ tračnom pilom, brušenjem brusnom pločom, potom brušenjem brusnim papirom sve do gradacije 600. Nakon toga su strojno polirani.

Na kraju su kemijski obrađeni kiselinom za nagrivanje izbrusaka od aluminija (Tablica 15) i sredstvom za fiksiranje.

Tablica 15. Sastav kiseline za nagrivanje makro izbrusaka aluminija

Količina	Vrsta kiseline
5 ml	HF
20 ml	HNO ₃
20 ml	HCl
60 ml	H ₂ O

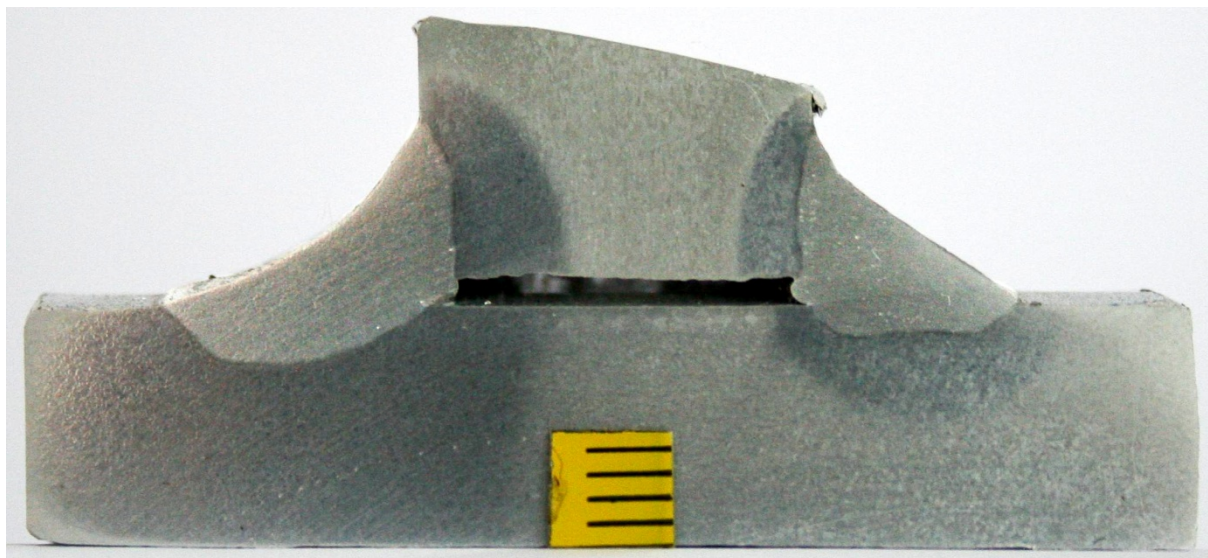
Na ručno zavarenom uzorku se primjećuje velika tolerancija provrta spojne ploče tijela stezaljke, (Slika 75).

Zavar je konkavnog oblika, širok i razmjerno nizak. Primjećuje se nejednakost dimenzija dva uzastopno izvedena zavar.

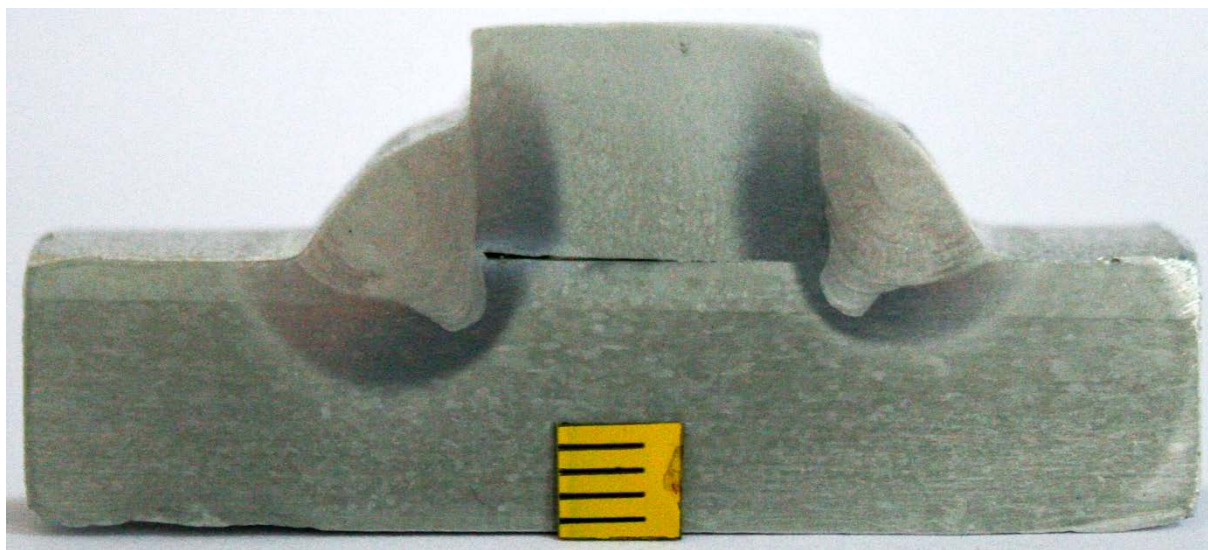
Drugi zavar je izveden dok je izradak bio zagrijan od prvog zavarivanja. Vidi se vrlo velika zona utjecaja topline drugog zavara i znatno veća dubina penetracije u osnovni materijal.

Iz oblika zavara uzorka izvedenog robotiziranim postupkom se primjećuje puno koncentriraniji unos topline, (Slika 76). Odstupanja u izgledu zavara i veličini zone utjecaja topline su znatno manja. Zavar je konveksan, nadvišen, te ima veću visinu uz manju površinu od zavara izvedenog ručnim postupkom.

Pregledom i usporedbom makro izbrusaka, utvrđuje se kako zavari izvedeni pomoću oba postupka nemaju grešaka i dobro su izvedeni, ali je zavar izveden robotizirano kvalitetniji zbog povoljnijeg oblika (manja širina, veća visina i dublja penetracija), manjih odstupanja dimenzija i uže zone unosa topline u osnovni materijal.



Slika 75. Makro izbrusak presjeka uzorka zavarenog ručnim postupkom

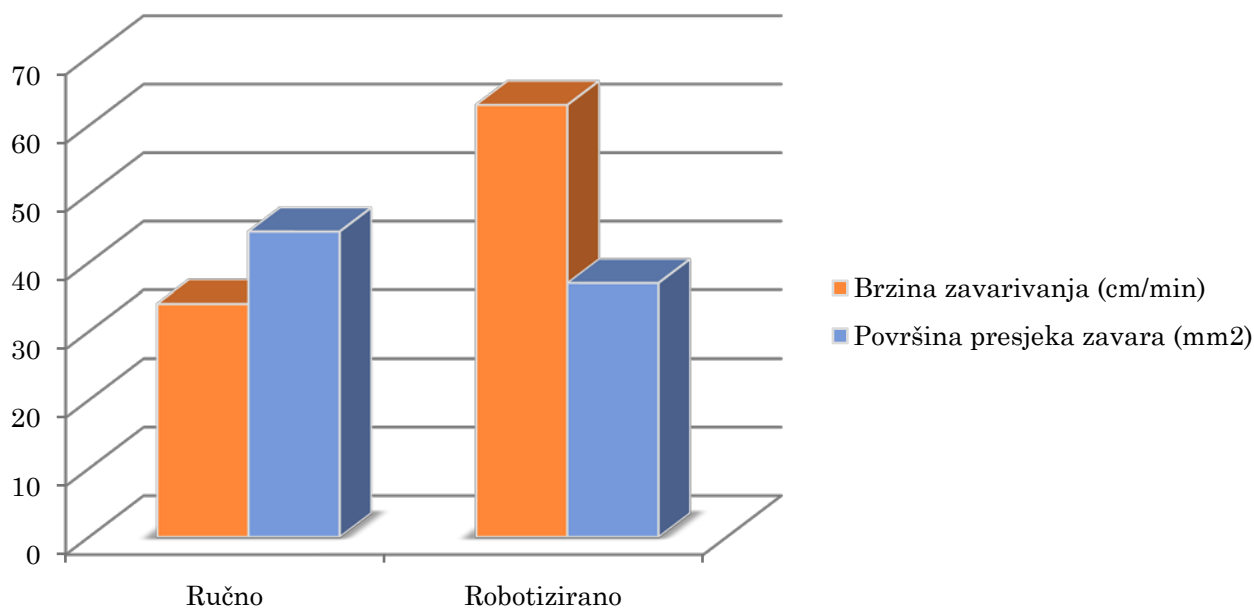


Slika 76. Makro izbrusak presjeka uzorka zavarenog robotiziranim postupkom

7.3 Ekonomska komparativna analiza ručnog i robotiziranog zavarivanja

Brzina zavarivanja je glavna prednost kod razmatranja ekonomske isplativosti uvođenja robotiziranog postupka zavarivanja.

Slika 77 prikazuje brzine zavarivanja uzoraka tijela kompresijske stezaljke zavarenih ručnim i robotiziranim postupkom uz korištenje vrlo sličnih pozicionera, istog položaja zavarivanja i jednakog načina prijenosa materijala, impulsnim MIG postupkom.



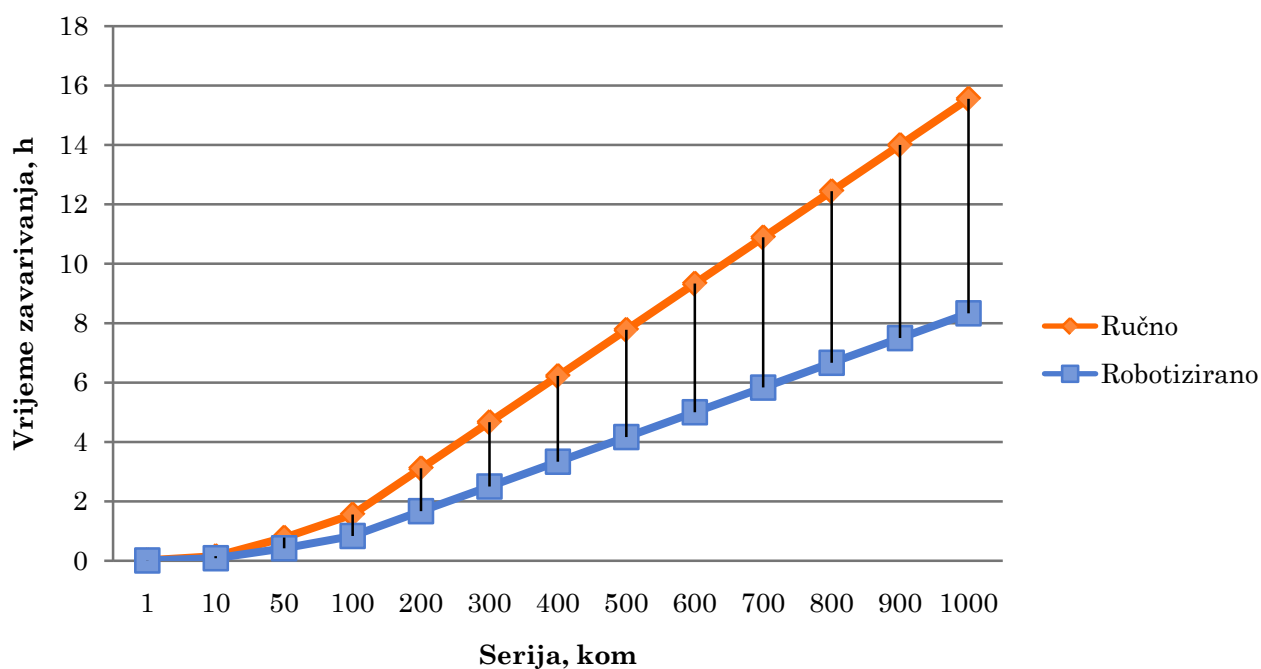
Slika 77. Usporedba proizvodnosti i dimenzija ručno i robotizirano izvedenog zavara

Robotizirano zavarivanje je značajno brže od ručnog, razlika u brzini je gotovo dvostruka, što je dovoljan uvjet za ekonomsku opravdanost robotiziranog postupka.

Uz to, površina presjeka robotizirano izvedenog zavara je manja, što upućuje na dodatnu uštedu zbog smanjene potrošnje žice za zavarivanje.

Direktna posljedica povećanja brzine zavarivanja je smanjenje vremena zavarivanja.

Kod ručnog i robotiziranog postupka elaboriranih u ovom radu se koristi ista tehnologija stezanja priprava. Iz toga se zaključuje kako su pripremna i završna tehnološka vremena jednaka, postoji razlika jedino u vremenu samog procesa zavarivanja.



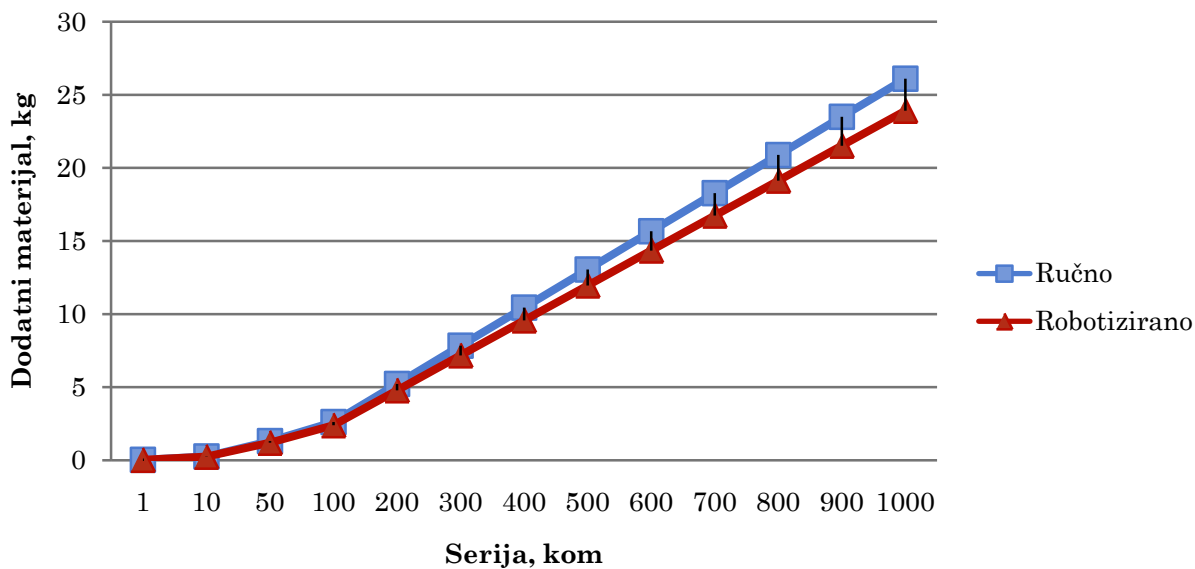
Slika 78. Vremena zavarivanja korištenjem robotiziranog postupka

Razlika vremena zavarivanja je značajna, zavarivanje ručnim postupkom traje skoro dvostruko dulje.

Na seriji od 1000 komada, vrijeme zavarivanja ručnim postupkom iznosi 15,6 h, a robotiziranim 8,3 h. Ušteda vremena zavarivanja korištenjem robotiziranog postupka je 7.2 h na toj seriji.

Radi toga je proizvodnost robotiziranog zavarivanja puno veća. Robotsku stanicu može posluživati operater, nije potrebno koristiti zavarivača sa skupljom satnicom..

Slika 79 prikazuje utrošak dodatnog materijala pri zavarivanju tijela kompresijske stezaljke ručnim i robotiziranim postupkom.

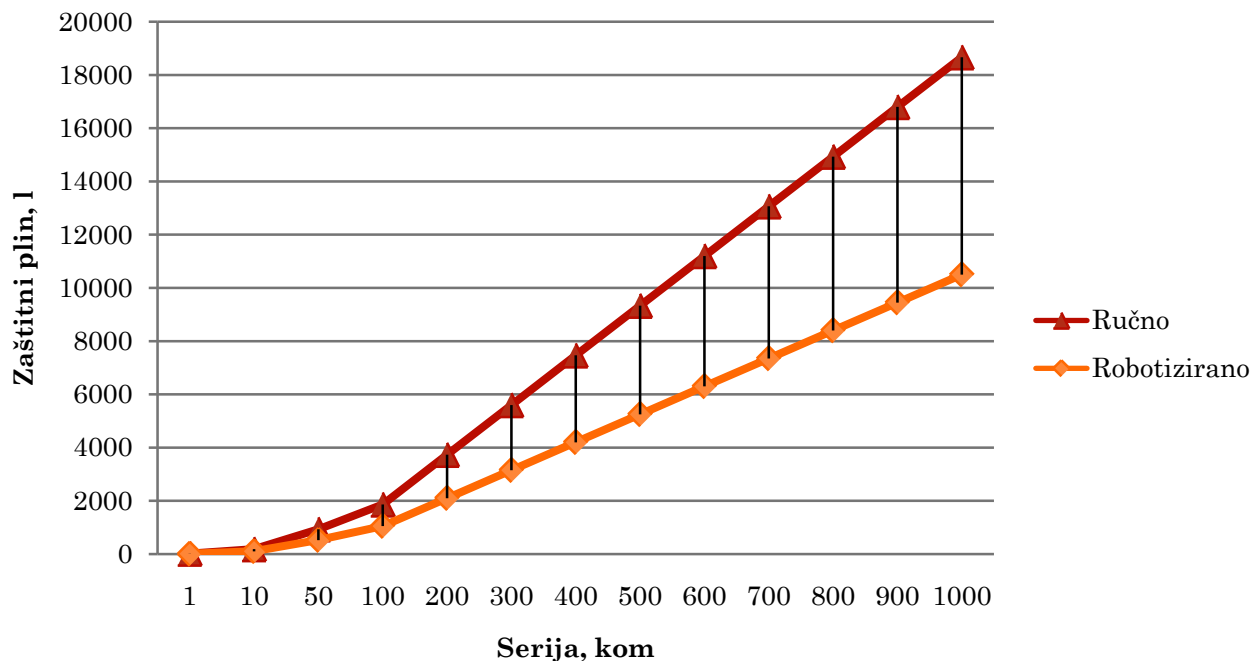


Slika 79. Razlika utrošenog dodatnog materijala između zavarivanja ručnim i robotiziranim postupkom

Kod oba postupka se nataljuje slična količina dodatnog materijala. Robotiziranim postupkom se koristi oko 2,2 kg manje dodatnog materijala na seriji od 1000 izradaka.

To znači uštedu od oko 8,5 % skupe aluminijske žice, što u velikoserijskoj proizvodnji predstavlja značajno i izravno smanjenje troškova proizvodnje.

Slika 80 prikazuje kretanje potrošnje zaštitnog plina povećanjem serije izrade kompresijskih stezaljki.



Slika 80. Smanjenje utroška zaštitnog plina korištenjem robotiziranog postupka

Razlika je značajna zbog korištenja slične brzine protoka kod oba postupka uz znatno veću brzinu robotiziranog zavarivanja.

Na seriji od 1000 izradaka ušteda zaštitnog plina korištenjem robotiziranog postupka je oko 8165 litara, što je otprilike jedna boca plina standardnog kapaciteta 9000 l.

U postocima, ušteda iznosi oko 44 %.

Robotizacijom postupka zavarivanja se izravno štedi zbog smanjenog utroška zaštitnog plina za zavarivanje.

7.3.1 Proračun uštede korištenjem robotiziranog postupka zavarivanja

Poduzeće Dalekovod proizvodnja d.o.o. godišnje proizvede oko 15000 aluminijskih zateznih kompresijskih stezaljki u različitim varijantama.

Veličine serije su od 300 do 10000 komada.

Približne cijene potrošnog materijala i cijene rada zavarivača su kako slijedi:

- cijena rada zavarivača, 80 kn/h,
- cijena dodatnog materijala (AlMg5), 100 kn/kg,
- cijena zaštitnog plina (100 % Ar), 200 kn po boci koja sadrži 9000 l plina, što iznosi 0,022 kn/l.

Na osnovi godišnje proizvodnje stezaljki i cijena potrošnog materijala i rada zavarivanja izrađen je približan proračun godišnje uštede proizvodnje korištenjem robotiziranog postupka zavarivanja.

Tablica 16. Ušteda novaca korištenjem robotiziranog zavarivanja godišnje količine stezaljki

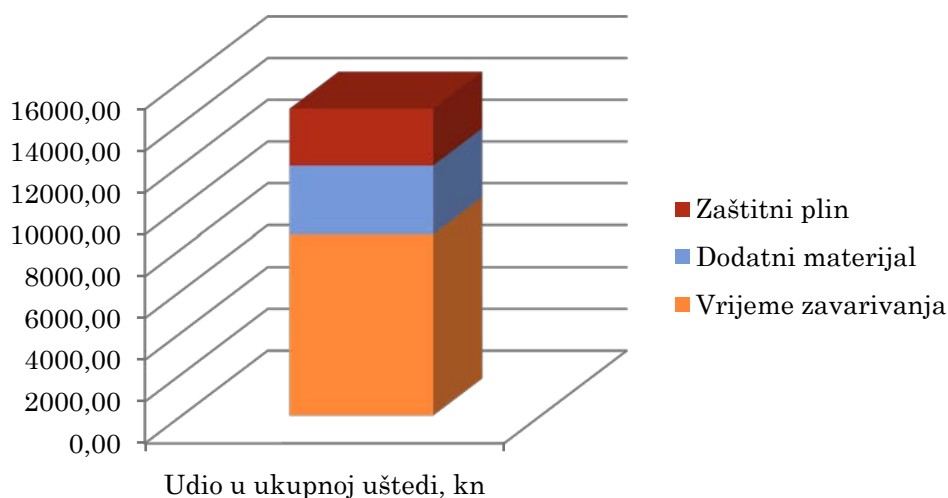
Čimbenik	Ručno zav (H), čimbenik/kom	Robot. zav. (R), čimbenik/kom	Razlika H-R, čimbenik/kom	Jedinična cijena, kn	Ušteda, kn/kom	Ušteda, kn/15000-kom
Vrijeme zavarivanja, h	0,01556	0,00833	0,00722	80,00	0,58	8666,67
Dodatni materijal, kg	0,02611	0,02391	0,00220	100,00	0,22	3297,92
Zaštitni plin, l	18,66667	10,50000	8,16667	0,02	0,18	2722,22
Ukupna ušteda, kn						14686,81
Ukupno vrijeme zavarivanja, ručno, h						233,33
Ukupno vrijeme zavarivanja, robotizirano, h						125

Tablica 16 prikazuje uštedu novaca na godišnjoj razini zbog korištenja robotiziranog postupka zavarivanja kompresijskih stezaljki.

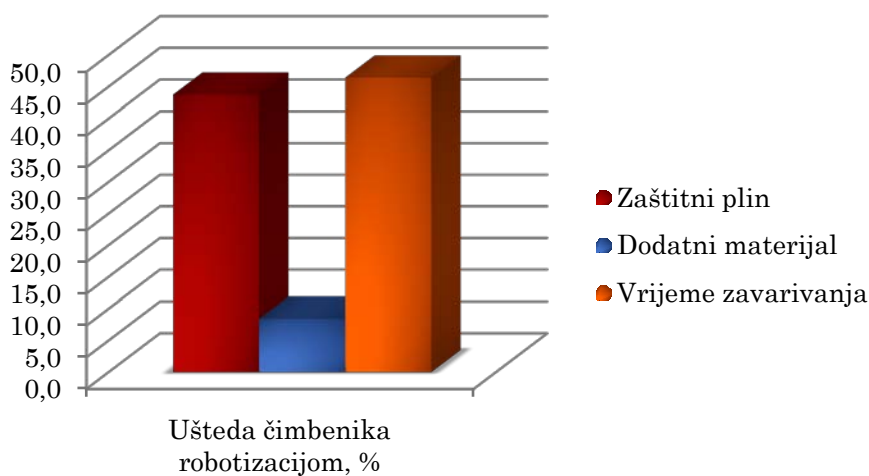
Parametri su izračunati na osnovi podataka iz Tablica 14.

Samo na jednom proizvodu, čije tehnološko vrijeme zavarivanja robotom traje 125 sati godišnje, moguće je uštedjeti skoro 15000 kn. Ako umjesto zavarivača robotsku stanicu poslužuje operater s nižom satnicom, ušteda je još veća, a zavarivači se istovremeno mogu baviti drugim poslom.

Primijećeno je kako već malo manja potrošnja dodatnog materijala uzrokuje značajnu uštedu zbog visoke jedinične cijene.



Slika 81. Udio uštede pojedinog čimbenika u ukupnoj uštedi



Slika 82. Uštede pojedinih čimbenika robotizacijom u odnosu na ručni postupak

Usporedbom grafikona na Slika 82 koji prikazuje smanjenje potrošnje pojedinih čimbenika robotizacijom u odnosu na ručni proces i grafikona na Slika 81 koji prikazuje njihov udio u godišnjoj uštedi zbog robotizacije, vidljivo je kako im međusobni odnosi nisu proporcionalni. Malim smanjenjem potrošnje dodatnog materijala se ostvaruje velika ušteda. Velikim smanjenjem potrošnje zaštitnog plina se ostvaruje mala ušteda. Vrijeme zavarivanja je dominantan čimbenik u oba slučaja.

8. ZAKLJUČAK

Usporedbom uzorka tijela zatezne kompresijske stezaljke zavarenog robotiziranim postupkom s uzorkom zavarenim ručnim postupkom, kakav se koristi u proizvodnji stezaljki, ustanovljeno je:

1. vizualnom kontrolom izgleda zavara i makro izbrusaka presjeka zavarenih uzoraka je ustanovljena bolja penetracija i veća visina zavara izvedenog robotiziranim postupkom, njegov pravilan i ravnomjeran izgled i nedostatak pogrešaka zavarivanja ukazuju na bolju kvalitetu zavara izvedenog robotiziranim postupkom,
2. robotizirani postupak zavarivanja koristi manji i koncentriraniji unos topline u osnovni materijal, što povoljno utječe na mehanička svojstva proizvoda nakon zavarivanja zbog manje zone utjecaja topline,
3. tolerancija pripreme izradaka i način stezanja koji se koristi za ručno zavarivanje su dovoljno dobri za ostvarivanje kvalitetnog zavara robotiziranim postupkom,
4. proizvodnost korištenjem robotiziranog postupka zavarivanja je značajno veća od proizvodnosti zavarivanja ručnim postupkom zbog velike razlike u brzini i izbjegavanja ljudske pogreške,
5. osim povećanjem proizvodnosti, robotiziranim postupkom se ostvaruju izravne uštede zbog:
 - a. Smanjenja vremena zavarivanja, koje je oko 47 % kraće u odnosu na ručni postupak, što donosi oko 59 % udjela u ukupnoj uštedi troškova postignutoj robotizacijom, zbog manjeg broja sati rada zavarivača. Postoji mogućnost još veće uštede ako se umjesto zavarivača zaposle operateri za zavarivanje koji imaju manju satnicu.
 - b. Smanjene potrošnje dodatnog materijala od oko 8.5 % u odnosu na ručni postupak. To rezultira udjelom u uštedi zbog robotizacije od oko 22.5 % zbog visoke jedinične cijene dodatnog materijala.
 - c. Velikog smanjenja potrošnje zaštitnog plina od oko 44 % u odnosu na ručni postupak, ali je zbog razmjerno niske cijene plina u dio u ukupnoj uštedi zbog robotizacije oko 19 %.

Zatezne kompresijske stezaljke su proizvod koji se ne može ponovno iskoristiti nakon komprimiranja. Proizvode se u količinama od oko 15000 komada godišnje u velikim rasponima serija od 300 do 10000 komada. Prodajna cijena im je razmjerno visoka zbog cijene materijala i većeg broja tehnoloških operacija potrebnih za izradu

Navedeno ukazuje na opravdanost upotrebe robotiziranog MIG zavarivanja u proizvodnji aluminijskih zateznih kompresijskih stezaljki.

Postoji mogućnost daljnjeg unapređenja proizvodnje stezaljki robotskim sustavom, smanjenjem tehnoloških vremena vezanih uz stezanje izratka korištenjem jednog ili više robotiziranih pozicionera s napravama koje omogućavaju zavarivanje više proizvoda u jednom stezanju.

Proces zavarivanja se može dodatno unaprijediti korištenjem mješavine argona i helija kao zaštitnog plina. Time je moguće još povećati brzinu zavarivanja i zbog veće penetracije smanjiti količinu nataljenog dodatnog materijala uz zadovoljavanje zahtjeva za visinom zavara. Zbog toga se još više povećava produktivnost i smanjuju troškovi u odnosu na ručni postupak zbog manjeg utroška potrošnog materijala.

9. LITERATURA

- [1] Goić, R., Jakus, D., Penović, I. Distribucija električne energije, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Split, 2008.
- [2] Web stranice HEP OPS d.o.o. [Mrežno] <http://www.hep.hr/ops>.
- [3] Hot, K. Elektroenergetske mreže, Tehničko veleučilište u Zagrebu, elektrotehnički odjel, Zagreb, 2005.
- [4] -, MIG/MAG-elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog/aktivnog plina, predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [5] Weman, K., Linden, G. MIG welding guide, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge England, 2006.
- [6] Pires, N., Loureiro, A., Bölmjö, G., Welding Robots, Technology, System Issues and Applications. London, Springer-Verlag London Limited, London, 2006.
- [7] Mathers, G., The welding of aluminium and its alloys, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge England, 2000.
- [8] Armao, F., et. al. Gas metal arc welding guidelines, Ohio, Lincoln Electric, 2003.
- [9] Kralj, S., Š. Andrić, Š. Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.
- [10] -, Welding Handbook, Seventh Edition, Volume 4., Metals and Their Weldability, American Welding Society, Miami, 1997.
- [11] Lukačević, Z., Zavarivanje, Sveučilište JJ Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet Slavonski Brod, 1998.
- [12] -, HRN EN 573-3:2011 Aluminij i aluminijeve legure -- Kemijski sastav i oblik gnječenih proizvoda -- 3. dio: Kemijski sastav i oblik proizvoda (EN 573-3:2009).
- [13] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J. Svojstva i primjena materijala, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2002.
- [14] Šurina, T. Robotizacija u tehnici zavarivanja. Zavarivanje 34. 1991, str. 171-175.
- [15] Velagić, J. Uvod u robotiku, skripta, Elektrotehnički fakultet univerziteta u Sarajevu, Sarajevo, 2003.
- [16] -, Sensor Based Adaptive Arc Welding White Paper, ABB, 2010.

[17] Cook, G.E., Electric arc sensing for robot positioning control, Robotic Welding, IFS Publications Ltd, UK, Springer-Verlag, 1987.